

# 自动驾驶功能仿真测试标准化需求研究报告

全国汽车标准化技术委员会智能网联汽车分技术委员会

全国汽车标准化技术委员会

智能网联汽车分技术委员会

2020年11月

## 目次

前言.....	4
1 自动驾驶功能仿真测试现状.....	5
1.1 仿真测试的意义和目的.....	5
1.2 仿真测试的定义与发展.....	6
1.3 仿真测试技术的问题和难点.....	8
1.4 智能网联汽车功能仿真测试的应用情况.....	10
1.5 小结.....	12
2 自动驾驶功能仿真测试通用要求标准化研究.....	13
2.1 仿真测试通用要求标准化目的.....	13
2.2 仿真测试相关术语与定义.....	13
2.3 仿真测试评价基本原则.....	15
2.3.1 全面性.....	15
2.3.2 真实性.....	16
2.3.3 可重复性.....	16
2.3.4 测试指标.....	16
2.4 仿真测试对象及要求.....	19
2.4.1 测试对象.....	19
2.4.2 第三方检测机构测试现状.....	22
2.5 仿真测试通用要求标准化可行性.....	23
2.6 小结.....	24
3 自动驾驶功能仿真测试工具标准化研究.....	25
3.1 仿真测试工具标准化目的.....	25
3.2 仿真测试工具概述.....	25
3.2.1 软件在环测试.....	25
3.2.2 硬件在环测试.....	26
3.2.3 驾驶员在环测试.....	26
3.2.4 车辆在环测试.....	27
3.3 仿真测试软件要求.....	27
3.3.1 仿真软件应具备基本功能.....	27
3.3.2 仿真软件性能现状.....	28
3.3.3 仿真模型与软件接口格式现状.....	32
3.4 仿真测试硬件要求.....	33
3.4.1 仿真硬件应具备基本功能.....	33
3.4.2 仿真硬件性能现状.....	34
3.4.3 仿真硬件通信接口现状.....	35
3.5 仿真测试工具标准化可行性.....	35
3.6 小结.....	36
4 自动驾驶功能仿真测试场景标准化研究.....	37
4.1 仿真测试场景标准化目的.....	37
4.2 仿真测试场景设计方法.....	38
4.2.1 数据来源.....	38
4.2.2 场景要素.....	39

4.2.3 设计方法.....	40
4.3 仿真测试场景评价方法.....	41
4.3.1 覆盖度评价.....	41
4.3.2 真实度评价.....	42
4.3.3 规范性评价.....	43
4.3.4 代表性评价.....	43
4.4 仿真测试场景管理方法.....	44
4.4.1 场景库构建.....	44
4.4.2 场景库更新.....	44
4.4.3 场景库检索结构.....	45
4.5 仿真测试场景数据格式.....	45
4.5.1 静态仿真场景数据格式.....	45
4.5.2 动态仿真场景数据格式.....	48
4.5.3 环境场景数据.....	49
4.6 仿真测试场景标准化可行性.....	49
4.7 小结.....	50
5 自动驾驶功能仿真测试流程与评价方法标准化研究.....	51
5.1 仿真测试试验流程标准化目的.....	51
5.2 仿真测试流程及要求.....	52
5.2.1 典型仿真测试流程及要求.....	52
5.2.3 仿真测试与道路测试的关系.....	56
5.3 仿真测试数据管理.....	57
5.3.1 仿真测试数据采集.....	57
5.3.2 仿真测试数据存储.....	59
5.3.3 仿真测试数据分析.....	60
5.4 仿真测试评价方法.....	60
5.4.1 仿真测试用例评价指标选取.....	61
5.4.2 仿真测试评价维度.....	64
5.5 仿真测试流程与评价方法标准化可行性.....	65
5.6 小结.....	65
6 自动驾驶功能仿真测试标准化结论.....	66

全国汽车标准化技术委员会发布

## 前言

随着智能化信息化与汽车的深度融合，汽车正在从传统的交通运输工具转变为新型的智能出行载体，各企业都在积极在智能网联汽车研发中大量投入，功能开发的方式越来越多元化，功能测试的手段也越来越多样化。联合国 WP29 GRVA 工作组提出多支柱法，以道路测试、场地测试、仿真测试、审核等多种方法来支撑自动驾驶功能的评价。仿真测试作为新兴的测试手段仍存在着诸多问题，国际和国内均尚不具备完善的标准体系，缺乏统一的认识。

本研究报告集合行业主流技术供应商、车企和第三方检测机构，通过分析行业现状、技术发展、法律法规及国内外标准等对仿真测试标准化需求及其可行性进行梳理与分析，为下一步国家标准制定提供参考。

在本研究报告编制过程中，各起草单位参阅了大量材料，并借鉴了行业的部分素材，鉴于篇幅有限，这里不一一列举，仅作诚挚的感谢！

在此，再次衷心感谢参与研究报告编写的各个单位和组织：中国汽车技术研究中心有限公司、上汽大众汽车有限公司、东风汽车集团有限公司技术中心、吉林大学、北京赛目科技有限公司、华为技术有限公司、泛亚汽车技术中心有限公司、东风商用车技术中心、戴姆勒大中华区投资有限公司、重庆车辆检测研究院有限公司、惠州市德赛西威汽车电子股份有限公司、浙江亚太机电股份有限公司、北京百度网讯科技有限公司、中国第一汽车集团有限公司、国汽（北京）智能网联汽车研究院有限公司、上海汽车集团股份有限公司、小马智行科技有限公司、北京四维图新科技股份有限公司。

主要编写人：张行、陈藨、何丰、朱冰、薛晓卿、程周、吴羽熙、伍勇、张培兴、陈化荣、刘建琴、李明昊、陈贞、陈瑶、赵帅、孙宇航、黎艳杨、翟洋、俞彦辉、吕鸣、王戡、赵祥磊、曾杰、樊景帅、刘涛、吕明、王鑫、彭伟、王泽林、吕志洪、张巍、孙健宁、杨帆、林丽芬、郝峥嵘、张嵩、王震、李阳、姚保军。

# 1 自动驾驶功能仿真测试现状

## 1.1 仿真测试的意义和目的

### 1) 仿真测试是构建自动驾驶技术创新体系的基础

2020年2月，我国发改委、工信部、公安部、交通运输部等11个国家部委联合出台《智能汽车创新发展战略》，从国家层面为智能网联汽车的发展作出战略安排，主要任务为构建6大体系，包括：技术创新、产业生态、基础设施、法规标准、产品监管和网络安全体系。计划在2025年实现有条件智能网联汽车规模化生产，高度智能网联汽车在特定环境下市场化应用，到2035年中国标准智能网联汽车体系全面建成的目标。其中，技术创新体系方面明确提出，从突破关键基础技术、完善测试评价技术和开展应用示范试点等三个方面，构建协同开放的智能网联汽车技术创新体系。为完善测试评价技术，为建立健全智能网联汽车测试评价体系及测试基础数据库，将重点研发虚拟仿真、软硬件结合仿真、实车道路测试等技术和验证工具，以及多层次测试评价系统。仿真测试对于自动驾驶的重要性由此可见一斑。

### 2) 仿真测试是传统汽车测评的替代与补充

传统整车测试的测试标准、测试要求和测试工具已经成熟，主要是基于实车进行的既定场景的测试。考虑到具备自动驾驶功能的车辆是传统车辆和自动驾驶系统的综合体，自动驾驶系统承担了驾驶人的部分甚至全部驾驶职责，因此对具备自动驾驶功能的汽车测试评价和传统汽车的测试评价有非常大的差别，需要对自动驾驶系统和车是进行综合测试评价。

仿真测试可以帮助研发人员和汽车认证检测机构去完善优化对自动驾驶系统产品的验证测试流程和认证检测方法。通过海量高覆盖度、复杂度的场景库，不但可以增加测试工况范围和复杂程度，更可以对其零部件、子系统与整车集成进行不同层级的全链条测试。通过仿真覆盖实车检测不能实现的长尾场景，在仿真测试环境下及早发现实车测试不易甄别的软件故障，仿真测试将逐步成为实车物理测试的补充或是替代，构成相互结合的有机整体。

加快自动驾驶仿真测试体系建设，可以帮助各地测试机构和示范区对自动驾驶系统进行更高效和全面的检测，减少实车测试及提升测试效率，从而节省测试

的时间与成本。

### 3) 仿真测试提高自动驾驶系统安全性

如何保证自动驾驶的安全，是在 2025 年实现有条件智能网联汽车规模化生产和高度智能网联汽车在特定环境下市场化应用的核心。相对于自动驾驶系统，人具有知识的泛化和推理能力，考驾照只需简单的场景，就可以在公开道路应对无限复杂、无限丰富的场景。随着自动驾驶的发展，仿真测试平台对复杂环境数据的日益积累，机器的功能不断被加强，有更丰富的经验安全地处理更为复杂的场景，需要人接管驾驶的几率越来越低。

模拟仿真平台提供大量的测试场景，对产品和解决方案进行测试，以测促研，通过高并发和加速测试加快产品的迭代更新，通过高水平的标准保障产品质量。仿真测试平台有能力承载自动驾驶系统运行全生命周期中的实时数据。当智能网联汽车获得认证许可后，自动驾驶系统仿真平台用来存储车辆实时行驶数据，收集并分析车辆遇到的危险工况并作为复现决策的依据，一方面用于检验产品的故障原因，另一方面提供产品的优化数据，从而保证自动驾驶系统产品质量的安全可靠与持续升级。

本项目通过对自动驾驶仿真测试进行调查研究，对面向研发和测评的仿真测试需求与应用进行调研，对智能网联汽车仿真测试平台和仿真测试硬件进行调研，分析智能网联汽车仿真数据标准化，研究仿真测试流程与评价方法标准化，建立智能网联汽车仿真测试标准体系框架，为仿真测试标准制定相关方提供参考。

## 1.2 仿真测试的定义与发展

### 1) 仿真测试的定义

自动驾驶仿真测试，是计算机仿真技术在汽车领域的应用，它以数学建模的方式将自动驾驶的应用场景进行数字化还原，建立尽可能接近真实世界的系统模型，通过仿真测试进行分析和研究便可以达到对自动驾驶系统和算法进行测试验证的目的。

在未来智能网联普及的时代，车辆已经进化为信息物理系统的一部分，仿真软件也将形成智能网联汽车与智能交通的中央数据平台。通过大数据与云计算为核心的仿真测试平台，记录车辆运行真实数据和软件算法的决策过程，记录与管

理单车、车队、道路与交通设施，复现车辆行驶的具体行为。届时，仿真平台不仅帮助自动驾驶系统更安全，也将是车队运营、道路设施与智慧交通的管理平台。

按照测试方式，仿真测试可分为：

仿真测试	内容
模型在环 (MIL)	在仿真测试模型中，将控制算法模型和被控算法模型连接起来形成闭环，即模型在环测试。这种测试方式在模型层面上实现闭环测试，主要目的是支持系统软件工程师做模型级别的集成测试。
软件在环 (SIL)	从模型在环测试引申而来，区别是把控制器的模型换成了由控制器模型生成的C代码，软件在环测试的目的是为了验证生成的代码和模型在功能上是否一致。
硬件在环 (HIL)	提供可以模拟真实的系统环境的动态系统模型作为“受控设备仿真”，并通过嵌入式系统的输入输出将其与仿真系统平台相连，形成闭环。硬件在环测试的目的是为了验证控制器。
驾驶员在环 (DIL)	在对车辆、发动机等系统进行仿真的基础上，在保证测试精度的前提下，增加了交通和环境的仿真，并将真实驾驶员引入仿真测试闭环，融合传感器仿真技术，结合3D实时动画，对系统进行验证。
车辆在环 (VIL)	将测试系统集成到真实车辆中，并通过仿真平台模拟道路、交通场景以及传感器信号，从而构成完整测试闭环。车辆在环测试的目的是验证测试系统功能、各场景仿真测试、与整车相关电控系统的匹配及集成测试。

## 2) 仿真测试的发展

使用计算机技术进行仿真测试，最早可以追溯到1940年代[1]。如今，计算机仿真技术广泛应用于核、电、飞行模拟，等各个领域[2]。早期的仿真测试主要建立在动力学仿真基础上，对车辆开发过程中的整车动力、操纵稳定性，制动等进行仿真测试参数优化。随着辅助驾驶与自动驾驶功能的不断发展，在仿真测试中，也逐渐提供具有简单道路环境、可编辑的环境车辆、行人等，和简单传感器模型的仿真测试。这类仿真测试，在测试整车性能基础上，增加了对驾驶自动化功能的相应测试。如今，面向高等级驾驶自动化功能的仿真测试，已具备相对复杂的系统架构。在回放真实测试场景之外，可以提供更接近真实动态交通的模拟环境，以及多样的驾驶事件或场景。同时，也有自动驾驶公司开始使用云服务来进行大规模高并发的仿真测试，能达到百万级车辆同时进行仿真测试的效果。

仿真测试技术的发展已经达到了使用高精度的自动驾驶地图、回放真实自动驾驶路测数据，并使用游戏引擎进行高保真的仿真测试阶段。在此背景下，仿真

测试技术在驾驶自动化功能开发过程中的重要性和实车测试的互补优势更加凸显。这主要体现在以下两个方面：

使用仿真测试平台，可以模拟真实世界中出现概率极低的危险场景，从而使自动驾驶系统在更加丰富和复杂的场景中进行高频度的有效测试验证，在保障安全高效的前提下实现更充分的测试验证效果，提高自动驾驶功能开发和测评的可靠性。

使用仿真测试平台对实车测试数据进行复现和泛化，不仅能够更加有效和深入地分析实车测试过程中的问题，进行针对性优化，而且可以更加精准地约束测试条件，提升测试效率，缩短功能开发和测试周期；

### 1.3 仿真测试技术的问题和难点

从宏观角度分析，仿真测试需要模块化、自动化。要求各家主机厂和供应商有较强的场景数据、测试数据管理能力、场景数据和仿真测试数据的分析能力。

仿真测试部署过程中存在以下主要问题和难点：

仿真测试技术的难点和问题	内容
相同算法在多样化仿真平台测试验证结果的一致性问题	如何保障 SIL、HIL、DIL、VIL 仿真测试结果一致性 如何保障不同仿真工具链测试结果一致性 如何保障仿真模型精度在不同平台中的一致性
仿真测试与实际测试结果的一致性问题	如何保证仿真模型与实际被测件的标定真实性和特性匹配 如何保证仿真测试各系统之间交互反馈时钟同步与实际测试的一致性
仿真测试过程的问题回溯机制	如何根据仿真结果，快速追溯并确认仿真测试过程中某一模块是否出现问题
仿真测试评价标准的多样化问题	如何评估安全性、稳定性等普通衡量标准 如何评估舒适性、通过性等难以衡量的标准
测试场景的针对性问题	如何针对被测驾驶自动化系统筛选相应的测试场景 如何快速迭代特定测试场景以测算验证被测系统的性能

目前仿真测试方法主要集中于 SIL、HIL、VIL。其中软件仿真测试平台是构建 HIL、DIL、VIL 的基础。软件在环测试包含仿真场景搭建、传感器模型搭建与

标定、软件算法集成、动力学模型标定集成、自动化仿真测试、仿真测试数据分析等模块。

软件在环的技术问题和难点如下表所示：

软件在环技术问题和难点	内容
复现自动驾驶仿真环境	仿真环境需包含离散和连续化的仿真测试场景。 仿真平台应具备搭建标准化测试场景能力和快速泛化测试场景的能力。
感知模型搭建	传感器物理特性标定。 传感器模型验证。 仿真软件参数匹配。
执行模型搭建	根据车辆整车参数建立车辆动力学模型 根据车辆的操纵稳定性、动力性、制动性标定车辆动力学模型 车辆动力学模型验证。
软硬件集成	软硬件接口统一。 软件和软件、软件和硬件联调。 软件接口多样性。 软硬件及执行机构时钟同步问题。
自动化测试	高效自动化构建大规模仿真测试场景、并对被测系统进行自动化测试。 基于场景数据库自动化分类、管理、检索场景数据。 分布式高并发仿真测试各软件算法功能。
数据分析	仿真测试数据的分层次存储。 仿真数据分析的方法论。 仿真测试评价

硬件在环技术的的技术问题和难点如下表所示。

硬件在环技术问题和难点	内容
资源硬件问题	硬件设施部署的成本较高，需要部署空间较大。
摄像头在环	视频黑箱仿真测试技术受限于仿真软件的视觉处理引擎，难以获得与实际环境完全相同的渲染画面。 仅适用于验证软件的逻辑性，难以验证软件的可靠性和有效性。 视频注入仿真测试技术根据实际道路视频做仿真验证，需保障仿真平台与视频的数据同步。
毫米波雷达在环	回波模拟器可模拟的目标物数量、目标物相对距离和目标物精度有限制。 毫米波回波模拟器模拟波形的物理特性需与仿真软件进行多次标定以匹配数据。

	毫米波回波模拟器与真实传感器物理特性仍然存在差距。
--	---------------------------

整车在环可以分为转毂试验台模拟和实车在环模拟。二者都存在以下问题和难点：

整车在环技术问题和难点	内容
效率较低	VIL 只适用于单车测试。
适配问题	对于第三方被测对象，有一定的适配和使用成本。
测试用例局限	无法在开放场地模拟极限工况。

针对车辆主动安全问题，整车在环测试技术无法在开放场地模拟极限工况，造成测试用例局限化问题。开放场地内的实际车辆与仿真环境的交互行为依赖仿真环境输出的信号，存在安全性问题。此外，对于户外远程仿真测试，建立可靠的仿真软件和实际车辆远程实时通信也是一大难点。

基于转毂试验台模拟的整车在环存在以下问题：

转毂试验台	问题
转毂的横向动力学模拟问题	传统的转毂无法实现前轮转向动作。
	转毂的扭矩动态响应要求高、扭矩测量精度高。
	传统转毂无法满足四轮转速差。
转毂的纵向动力学模拟问题	四轮在不同路面的条件下与道路摩擦系数不同。
	车辆制动时，转毂的瞬时功率、扭矩非常大。
雷达目标模拟器工作不稳定	车辆在转毂上运行时，车辆会有晃动情况，会导致雷达目标模拟器无法正常工作。
车辆动力学模型	车辆的加速度、姿态信息需要由动力学模型计算并注入至被测系统，存在接口和协议匹配问题。

## 1.4 智能网联汽车功能仿真测试的应用情况

### 1) 面向研发的仿真测试需求与应用

与开发其他电控系统相似，研发自动驾驶系统，需要在不同阶段进行各种仿真测试。目前 EE 系统开发流程中所应用的功能安全与预期功能安全标准 ISO26262 和 ISO21448，对功能开发在不同阶段的测试验证要求提供了参考规范。如今我们也需要将这些行业参考规范拓展到自动驾驶功能开发过程中，因此仿真测试的方法就变得不可或缺。

在系统开发阶段，需要建立算法模型并进行仿真测试，根据仿真测试结果，不断优化系统设计。这个阶段的仿真通常被定义为模型在环。L3 级自动驾驶产

品开发，系统设计包括视觉、雷达、高精地图、定位、多传感器融合等感知算法的开发，也包括规划、决策乃至执行等算法模型开发，所有这些都需要进行模型在环仿真测试。

在完成模型在环测试后，对算法模型进行代码转化，形成代码，同样需要对代码进行仿真测试，进行代码与算法模型等效性测试，保证代码与算法模型一致。该阶段测试通常被定义为软件在环。之后进行还需进行处理器在环仿真。

MIL、SIL 两个阶段的测试是针对算法进行的软件测试，之后需要进行针对所开发的系统硬件在环仿真测试，既包含软件的测试，也包含硬件、底层软件、应用层软件的系统测试。

上述过程完成之后，系统本身开发的阶段性任务完成。在此之后需要进行整车层级的集成测试，整车层级的集成测试不可能完全依赖于路测，考虑里程要求和极端测试场景，必须依赖仿真试验和场地试验、道路试验的有机结合才能满足自动驾驶功能的安全放行。该阶段的测试方式包含整车模型在环(MIL)、软件在环(SIL)、硬件在环(HIL)、驾驶员在环(DIL)、车辆在环(VIL)测试，其中 DIL、VIL 则主要用于复杂场景下人机交互评价、自动驾驶功能/性能的主观评价。

以上无论是 MIL、SIL、HIL，还是 DIL、VIL 都需要建立在仿真测试环境之上。仿真测试环境包括感知传感器模型、规划决策模型、执行系统模型，同时需要建立车辆动力学模型，在此基础上，还需构建驾驶场景模型、相应的高精度地图、动态交通环境、天气等其他环境信息，以及以上各仿真系统之间的交互应用。这些仿真系统的充分应用将会逐渐成为自动驾驶功能开发过程中不可缺少的一环。

## 2) 面向测评的仿真测试需求与应用

面向测评的仿真测试定义了自动驾驶产品测试、监管与评价中的作用与需求、测试目标，测试适用范围等。2020 年 1 月 8 日，一汽宣布在 HS9 车型上搭载 L3 自动驾驶。其他国内厂商如上汽、北汽、小鹏、威马也纷纷宣布各自 2020 年 L3 级自动驾驶产品计划。2020 年 2 月 24 日《智能汽车创新发展战略》的发布，为 L3 级别智能网联汽车明确了风向。紧随政策风向，广汽、长安两大汽车集团先后在 3 月释放 L3 级技术量产信号。

《汽车驾驶自动化分级》报批稿对 L3 级自动驾驶的定义是，驾驶自动化系

统在其设计运行范围内持续地执行全部动态驾驶任务，在功能开启时，驾驶员无需监管驾驶自动化系统的行为。对于3级驾驶自动化，动态驾驶任务后援用户以适当的方式执行接管。这意味着对于3级驾驶自动化系统的安全性要求将远大于2级驾驶自动化系统因此无论是从各国政府层面，还是整车厂商、系统供应商、以及相关的自动驾驶功能开发者，都高度重视自动驾驶的安全性。为保证安全性，既需要从开发层面保证，也需要从验证层面保证。

联合国世界车辆法规协调论坛（UN/WP.29）自动驾驶与网联车辆工作组（GRVA）针对自动驾驶功能提出“多支柱法”，结合审核与审计、仿真测试、场地测试、真实道路测试多个“支柱”开展。其中在设计安全与操作的七大模块26个子项中，审核认证贯穿20项，其中仿真测试11项。国外的汽车厂商以及自动驾驶功能开发者，高度重视仿真测试，以宝马公司为例，2021年投产的具备L3功能的车型，进行2.4亿英里的仿真测试，而Waymo公司具备日仿真1000万英里的能力，并总计开展了100亿英里的仿真测试。

国内的汽车厂商，在自动驾驶仿真测试方面处于起步阶段，但也开始重视起来，纷纷准备建立高并发、集群管理的虚拟仿真云平台，用于自动驾驶测试和验证。而以百度、腾讯、华为代表的互联网公司，已经开发出自动驾驶虚拟仿真云平台，全都具备日仿真百万公里以上的能力。

## 1.5 小结

仿真测试是自动驾驶系统开发过程中的必要条件，是高效改进智能网联软件算法的迭代技术。仿真测试也是自动驾驶技术创新体系的基础，是车辆测评的重要手段。然而目前各仿真平台之间存在接口定义不明确、接口不统一，各家公司存在测试内容和测试边界不明确问题。各仿真工具存在各种集成和通信问题，缺乏规范的标准化流程约束仿真测试的手段和内容。

自动驾驶仿真测试流程体系，应满足当前自动驾驶系统仿真测试需求，并为车辆的仿真测试提供指导依据。因此合理标准化自动驾驶仿真测试规范对智能网联汽车的研发与测评至关重要，并且需要对仿真测试通用标准，测试工具，场景及测试流程和评价方法进行深入的调研，论证标准化的可行性。

## 2 自动驾驶功能仿真测试通用要求标准化研究

### 2.1 仿真测试通用要求标准化目的

仿真测试需要对多种来源的数据、不同功能的算法进行客观、可重复且结果一致的测定与评价，当前仿真测试可通过 SIL、HIL、VIL 等综合在环测试方法开展，但如何区分对各阶段的测试结果进行评价，保证测试结果的全面性、真实性和可重复性并不明确，而且各阶段的要求模型与数据需要前后关联也并不清晰区分。

仿真测试通用要求的标准化可以使行业在仿真测试相关术语与定义上达成相关共识，明确仿真测试的对象并为行业提供仿真测试应遵循的基本原则。

### 2.2 仿真测试相关术语与定义

国内外标准组织对仿真有很多的术语和定义，本文摘录部分术语和定义：

#### 1) GB/T 34590.1-2017 道路车辆 功能安全

第 1 部分：术语

术语	英文	定义
测试	Testing	通过计划、准备、运行或演练相关项或要素，以验证其满足所定义的要求、探测其异常、对其行为建立信心的过程。
验证	verification	确定某个阶段或子阶段的要求是否完整且正确的定义或实现。

#### 2) 中汽协团标 自动驾驶系统功能测试 7 仿真测试

(征求意见稿)

术语	英文	定义
仿真	Simulation	使用一个相似或等效的系统对真实系统进行模拟，使其行为相似于或表现为真实的系统。
仿真测试	Simulation Test	使用仿真的方式对系统进行模拟测试。
仿真模型	Simulation Model	通过仿真软件或硬件实现，将系统的数学模型转换为仿真系统中的等效模型。
测试场景	Test Scenario	智能网联汽车与其行驶环境各组成要素在一段时间内的总体动态描述，这些要素组成由所期望检验的智能网联汽车的

		功能决定。
测试用例	Test Case	给定测试场景中各个场景要素具体参数，是测试场景的具体体现，用于直接测试自动驾驶系统。
软件在环测试	Software-in-the-LoopTest, SiL	基于软件进行的模型驱动的数字仿真测试方法。
硬件在环测试	Hardware-in-the-LoopTest, HiL	被测系统中的传感器、控制器和执行器中部分实物嵌入仿真回路之中进行的仿真测试。
车辆在环测试	Vehicle-in-the-LoopTest, ViL	完整的车辆系统嵌入仿真回路之中进行的仿真测试。
驾驶员在环测试	Driver-in-the-LoopTest, DiL	驾驶员的实际驾驶行为嵌入到仿真回路之中进行的仿真测试。
自动驾驶系统	AutomatedDriving System	搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置,并融合现代通信与网络技术,实现车与X(人、车、路、云端等)智能信息交换、共享,具备复杂环境感知、智能决策、协同控制等功能的驾驶系统。
精确度	Accuracy	参数值与其“真值”之间的差异。
逼真度	Fidelity	仿真对仿真对象某个侧面或整体的外部状态和行为的复现程度。
可靠性	Reliability	在给定条件和给定时间间隔内,完成规定功能的能力。
稳定性	Stability	系统克服外部干扰并逐渐恢复到原来的平衡位置或轨迹的能力。
验证	Validation	通过提供客观证据,确认以满足特定使用或应用的要求
校核	Verification	通过提供特殊要求已得到满足的客观证据来进行确认。

### 3) 2019 自动驾驶仿真技术蓝皮书

术语	英文	定义
仿真系统校核	Verification	确定仿真系统准确地代表了开发者的概念描述和技术要求的过程;
仿真系统验证	Validation	从仿真系统应用目的出发,确定其代表真实系统正确程度的过程
仿真系统确认	Accreditation	是官方正式地接受一个仿真系统为专门地应用服务地过程

综上,国内的国标,团标,蓝皮书对仿真相关的通用要求都有不少的术语和定义,但也存在不完整和歧义的情况,举例如下:

引用出处	术语	英文	定义
GB/T 34590.1-2017 道路车辆 功能安全 第1部分:术语	验证	verification	确定某个阶段或子阶段的要求是否完整且正确的定义或实现。
中汽协团标 自动驾驶系统功能测试 7 仿真测试（征求意见稿）	验证	Validation	通过提供客观证据，确认以满足特定使用或应用的要求
2019 自动驾驶仿真 技术蓝皮书	验证	Validation	从仿真系统应用目的出发，确定其代表真实系统正确程度的过程

同一个术语在不同的文件中，对应的中英文的术语和定义是不一致的，术语和定义不统一会带来混乱和交流障碍，无法保证信息传递的准确性和完整性。查询相关标准和文献，能直接引用的和自动驾驶仿真测试相关的术语和定义覆盖范围还是比较小且不完整。综上，“没有术语就没有知识”，术语和定义是公众获取自动驾驶仿真测试的基础，对相关术语和定义进行统一、规范及翻译对照工作，是一项非常有意义的基础性工作，有利于促进自动驾驶仿真测试的发展，促进相关的理解和沟通。

## 2.3 仿真测试评价基本原则

仿真测试应遵循的基本原则为全面性、真实性和可重复性，其定义如下：

**全面性：**仿真测试的测试场景应能充分覆盖 ODD 和边界场景，并且能用多种测试方法对被测功能的全部层级在不同开发阶段进行测试。

**真实性：**仿真测试的场景参数应基于实际，逻辑参数设置合理，并且测试输出结果应与实车测试保持基本一致。

**可重复性：**仿真测试中的同一测试用例的在同一测试平台多次测试结果应保持高度一致，在不同测试的平台的测试结果的偏差应符合设计要求。

### 2.3.1 全面性

#### 2.3.1.1 测试场景的全面性

- (1) 测试场景设计要求能充分覆盖设计的 ODD，从而保证自动驾驶功能在 ODD 内的验证是充分的，以检验其基本功能是否实现，功能安全、预期功能安全得到验证。

- (2) 测试场景应考虑极端场景. 过于理想的测试环境无法验证自动驾驶产品性能的好坏, 因此测试场景应包含边缘场景、事故场景等一些极端场景, 通过对极限工况的验证提高自动驾驶产品的安全性、稳定性、可靠性。

### 2.3.1.2 测试对象的全面性

测试对象需要包含自动驾驶功能中涉及的所有感知-决策-执行系统, 以及对应的软硬件部分, 确保自动驾驶系统在感知、决策、执行等各个层面得到充分的验证, 提高自动驾驶系统的安全性。

### 2.3.1.3 测试方法的全面性

由于测试对象不同, 仿真测试形式不同, 测试方法需包含模型在环(MIL)、软件在环(SIL)、硬件在环(HIL)、驾驶员在环(DIL)、车辆在环(VIL)等, 覆盖产品开发的各个阶段。测试场景数据库、测试平台工具链能够覆盖感知层、决策层和执行层, 支撑整个研发设计阶段

## 2.3.2 真实性

- (1) 测试场景库建设的原始数据来源应该真实。
- (2) 车辆动力学模型作为被控对象时, 需要标定和验证车辆动力学模型, 并要求在相同工况下车辆动力学模型仿真结果与实车试验结果较为一致。
- (3) 在已知相同测试场景与工况下, 实车测试与仿真测试的结果差异应该保证在可控范围之内, 同时测试结果的趋势应与实车测试一致。

## 2.3.3 可重复性

- (1) 在同一测试平台下, 同一测试工况的多次测试结果应保持高度一致, 且测试结果偏差应该在可接受范围之内。
- (2) 通过参数调整, 至少保证同一个被测对象在不同仿真平台、不同时刻的多次试验的结果应保持高度一致, 且同一工况的测试结果偏差应在可接受范围内。

## 2.3.4 测试指标

### 2.3.4.1 全面性

- (1) 国内现状：全面性是场景测试中测试用例应完全覆盖自动驾驶系统的功能定义及 ODD 范围。测试场景需要覆盖标准法规场景、自然驾驶场景和重组场景、危险工况仿真场景。标准法规测试场景是自动驾驶功能在研发和认证阶段需要满足的基本场景，需要覆盖基于 ISO、NHTSA、ENCAP、CNCAP 等多项标准。参数重组仿真场景旨在将已有仿真场景进行参数化设置并完成仿真场景的随机生成或自动重组，进而补充大量未知工况的测试场景，有效覆盖自动驾驶功能测试盲区。
- (2) 国际情况：基于场景的验证包括再现特定的真实世界情况，这些场景可以锻炼和挑战装有 ADS 的车辆在特定 ODD 中安全运行的能力。场景包括动态驾驶任务（DDT）或 DDT 序列。DDT 可以是计划内的（例如左转）也可以是计划外的（例如，碎片落在车辆前面）。场景还可能涉及广泛的要素，例如不同的道路布局；不同类型的道路使用者和表现出静态或不同动态行为的物体；以及不同的环境条件（以及许多其他因素）。

### 2.3.4.2 真实性

- (1) 国内现状：
  - a. 车辆动力学模型真实性：自动驾驶的车辆动力学模型主要涉及车辆的纵向性能（加速、减速）和横向性能（转向性能）。制定统一的测试工况，通过仿真和实车场地测试进行数据对比，来验证动力学模型真实性。车辆的纵向性能测试包括滑行测试、水平道路直线行驶测试、上下坡直线行驶测试、制动测试。对比各个工况的车速、减速度曲线的误差进行对比分析。车辆的横向性能测试包括原地转向力测试、稳态回转测试、瞬态响应测试等。对比各个工况的横摆角速度、侧向加速度的误差进行对比分析。具体误差要求由各个厂家确定，一般情况下误差达到 15% 以内即认为满足真实性要求。
  - b. 测试场景的真实性：测试场景包括道路、天气等静态场景和交通流等动态场景。仿真的测试场景是通过传感器获取的，需要结合传感器模型的输出数据进行评价。

传感器的仿真目前都是基于游戏物理引擎实现的，对于摄像头的仿真可以通过图像的色彩，对比度，像素，畸变等进行定性评价，对于激光雷达的仿真和毫米波雷达的仿真需要对各个传感器进行建模，模拟激光点云或雷达波的反射特性，通过给定场景的传感器反馈结果是否跟真实传感器数据一致进行评价。

对于交通流数据，基于自然驾驶的场景还原、已发生的事故数据还原、标准法规场景的场景是真实可信的。针对于重构生成的场景，需要对场景的合理性进行评估，分析场景因子之间的相关性，剔除不合理的场景。目前不清楚各个厂家的评价标准。

- c. 系统测试结果的真实性：结合具体功能，根据不同测试场景和工况，进行仿真测试和实车场地测试。对工况的具体指标进行误差对比。例如 AEB 功能，对系统触发各级警示的 TTC、制动距离、避撞结果、碰撞速度等指标进行对比，分析仿真测试结果和实车的误差。

(2) 国际现状：暂无相关信息

#### 2.3.4.3 可重复性

- (1) 国内现状：仿真模型的参数化设置，决定了自动驾驶仿真测试可以精确模拟，不管是正常工况还是危险工况，都可以进行重复测试和验证。结合具体测试功能，设计不同测试场景和工况，进行 3 次以上仿真测试。每个工况的仿真的初始条件、中间过程确保一致，仿真结束后对自车的行驶轨迹、速度、加速度等参数进行对比分析，判断测试结果的一致性。具体误差要求由各个厂家确定，一般情况下仿真结果的误差很小，可以忽略不计。
- (2) 国际现状：仿真一个局限性是模拟测试的精确度有限。因此，验证仿真测试的目的是验证仿真工具链的准确性。验证仿真工具链准确性的一种方法是比较被测对象在仿真测试中的评价指标与其在相同场景时物理测试的性能。考虑到与测试跟踪测试相比，仿真测试可以执行的场景数量很多，验证可能需要在关键场景的较小部分上执行。

综上所述，仿真的全面性需要根据厂家的需求和 ODD 范围进行评估，如何证

明场景满足全面性要求还处于研究阶段。仿真的真实性主要通过实车进行对比进行评价，评价方法和指标没有统一标准。仿真的可重复性的评价标准比较明确。

## 2.4 仿真测试对象及要求

应明确仿真测试的测试对象及其分类，并明确不同测试对象所对应的测试类型及其仿真模型要求。

### 2.4.1 测试对象

#### 2.4.1.1 MIL 阶段的仿真测试对象

模型在环主要应用于算法开发阶段，以验证模型能否实现功能，是否有严重BUG。方便做覆盖率测试，分析模型精简程度，防范死循环的出现。在测试决策层时，可以实现纯软件仿真，依托仿真平台的性能，加速测试，提高效率。

算法模型接收到仿真环境传来的目标真值列表信号后，进行决策，输出控制信号，以及其他状态变量，包含车辆的模式管理、横向控制、纵向控制、安全决策、人机管理等。将控制算法与车辆模型连接起来，形成闭环，并根据车辆模型状态变换输入，来对控制算法实现的功能进行测试。

#### 2.4.1.2 SIL 阶段的仿真测试对象

##### (1) 感知算法

感知系统根据各个传感器传回的原始数据、目标级数据，根据算法进行目标数据滤波和感知，并利用多源异构传感器信息融合策略，对目标进行进一步筛选，并重构车辆周边环境模型。摄像头、毫米波雷达给环境感知系统以目标级数据列表为主，而激光雷达目标识别需要较强的计算能力，因此需要单独的 GPU 工控机进行目标识别后，再进一步传送至环境感知系统。超声波雷达的工作原理较为简单，只具备测距能力不具备方位角测量能力，需要进行数据处理的量较小，以模拟信号处理为主，传感器传回的数据就是目标距离，因此不需要类似于图像、点云的目标识别的复杂算法。

感知统对车辆周边环境的精准判断是 ADAS/AD 的决策主要输入，感知出错，决策也无法保证正确。

## (2) 决策算法

计算平台根据自身定义的 ADAS/AD 算法，利用感知环节的输入，进行多传感器感知信息的融合，依据车辆所处场景信息，做出自身的决策规划，规避障碍物，完成既定的自动驾驶任务。同时输出控制信号，驱动车辆做出横向或者纵向运动。决策是比较关键的一部分，决策是在感知基础上对下一步（加速还是减速、如何转向等）进行判断，同时，决策系统还会兼顾舒适性和安全性问题。控制指的是车辆本身的一些控制系统，它通过决策大脑对车辆下达一些指令，比如说转向、刹车、加速。

### 2.4.1.3 HIL 阶段的仿真测试对象

#### (1) 感知系统处理器

毫米波雷达与摄像头在传感器端已经集成了目标识别、滤波、跟踪算法实现的的处理器，可以输出已经滤波后的目标信息，例如车辆目标距离、相对速度、车道线宽度、车道线长度、车道线相对位置、交通标志识别结果等。

激光雷达的线束越多、探测范围越广，单次处理的点云数量也随之增加，对处理器的性能需求也随之增强，因此是否集成处理器与传感器使用的性能有关。

V2X 车路协同的车载终端接收和输出至环境感知传感器的都是目标级信号，因此对数据处理器性能要求并不高。

超声波雷达的信号处理以模拟信号，且只有较为单一的数据，因此低性能的处理板卡就能覆盖需求。

#### (2) 决策系统控制器

计算平台功能性能场景库，测试计算平台在运行过程中的功能与性能。计算平台作为自动驾驶大脑，在系统架构上，域控制器作为整车电子电器中的一员，有功能安全等级的要求。

### 2.4.1.4 VIL 阶段的仿真测试对象

#### (1) 被测车辆整车

自动驾驶样车要求工作在自动驾驶模式，首先需要对样车线控系统进行改造，

完成驱动系统、制动系统、转向系统和档位系统 CAN 总线可控并满足精度要求。

- a. 驱动系统：自动驾驶样车采用油车，驱动系统控制发动机油门，控制油门百分比对应油门踏板开度，符合发动机 J1939 相关标准，驱动系统可连续响应自动驾驶系统指令，控制车辆稳定运动。
- b. 制动系统：通过 CAN 总线发送制动减速度指令，车辆实时反馈制动状态信息，制动系统能在沥青路面提供连续可控的减速度。
- c. 转向系统：线控转向系统采用电子助力转向系统（EPS），通过 CAN 总线控制方向盘角度，并反馈转向系统的角度、扭矩、角加速度等状态信息；EPS 电机根据机械参数进行匹配，能快速响应 CAN 总线控制信号。
- d. 档位系统：自动驾驶样车选用自动变速箱，可接受 CAN 总线指令，控制车辆运行在前进档、空档、后退档，并通过 CAN 总线反馈档位信息。

工具链部署要求：

- a. 实车设备部署：包含自动驾驶算法计算平台安装，仿真测试计算平台安装，以及必要外设的安装。包含设备固定，设备供电，设备通信物理链路连接。
- b. 实车软件部署：包含自动驾驶算法模块配置，虚拟仿真软件配置，通信接口模块安装配置。
- c. 实车设备通信接口调试：包含虚拟仿真软件与自动驾驶算法之间的通信调试、虚拟仿真软件与车辆之间的通信调试，自动驾驶软件与车辆之间的通信调试。
- d. 实车测量设备调试：设备自身调试，设备与主车设备通信调试。

(2) 被测感知功能

- a. 毫米波雷达；
- b. 超声波雷达；
- c. 激光雷达；
- d. V2X 车路协同车载终端；
- e. 高精度地图；
- f. 摄像头。

### 2.4.1.5 DIL 阶段的仿真测试对象

驾驶员在环测试，可以开展 ADAS 和 AD（自动驾驶）控制器的主观评价，人机交互界面的设计评价，以及自动驾驶系统的人机接管功能测试。

- (1) 控制器测试方向上的 DIL 测试对象：将 ADAS 和 AD（自动驾驶）控制器集成到驾驶模拟器上，能够在整车开发流程早期进行 ADAS 和 AD 系统功能的驾乘体验主观评价，即通过主观评价的方式来评价系统功能的用户友好程度和可接受度，以便整车厂进行性能对标及系统方案选型。同时可以在整车开发流程后期进行 ADAS 和 AD 系统功能的驾乘体验主观评价，以便整车厂进行控制器虚拟标定。
- (2) 人机交互方向上的 DIL 测试对象：人机交互的 DIL 在环主要应用于人机交互界面及控制域开发阶段的测试验证，用于验证人机交互界面的可用性、合理性、规范性、安全性。通过 DIL 在环平台中复现 HMI 的控制逻辑和界面元素，分析试验中的车辆状态数据和驾驶员行为表现数据，对人机交互界面进行测试验证。可以测试人机交互界面中的仪表预警信号、预警时机、文字符号清晰度、中控的导航、收音机、音乐调节、空调调控、HUD 清晰度、HUD 界面设计。通过人机交互的 DIL 测试，可以提高 HMI 的安全性和美观度，降低成本风险。
- (3) 人机接管功能：人机接管功能根据周边场景环境、本车状态以及驾驶员的状态提供人机接管信号，并根据驾驶员响应来执行响应的控制权转换。通过模拟或者实际道路的场景触发人机接管功能开启，并测试在规定接管场景触发接管信号的显示时间、体现形式是否达标，在接管信号期间，自动驾驶功能的显示是否清晰，驾驶员接管操作策略的合理性以及稳定性，期间自动驾驶相关 HMI 信号的合理性。

可将人机接管功能策略移植到仿真平台中，利用 DIL 的安全性与可重复性，对人机接管功能进行测试评价。

### 2.4.2 第三方检测机构测试现状

当前第三方检测机构主要围绕感知、决策、执行系统进行仿真测试。如下表所示。

决策控制 器	车辆动 力学模 型	底盘执行 子系统	被测整车	感知算法	决策控制算法
HIL 台架	动力学 软件	HIL 台架	VIL 台架 场地在环 VHIL	SIL 软件在 环、原始数据 注入	目标级数据注入

在感知层面，检测机构利用设备和软件可完成对传感器整体系统进行仿真测试，当前主要难度在于检测机构很少能拿到主机厂的开放性传感器接口协议。下表为第三方检测机构仿真测试过程中对感知系统的需求情况。

毫米波 雷达系 统	雷达目 标处理 器	摄像头目 标识别系 统	图像识 别处理 器	激光雷达 系统	点云目 标识别 处理器	超声波 雷达系 统	超声波雷 达信号处 理器
✓	——	✓	✓	——	✓	✓	——
雷达模 拟器	——	视频暗箱	视频流 注入	激光雷达 模拟器	点云注 入	模拟器	——
V2X 车 载终端 系统	车载终 端处理 器	GNSS 定位					
✓	——	✓					
路侧模 拟终端	——	备注：✓表示需要做，——表示待确定。 激光雷达形式很多，固态、机械扫描、线束数量，类型过多。					

在决策与执行层面，动力学模型是影响测试结果的关键要素，但第三方检测机构较难获得精确的动力学模型。除此之外，加大检测机构进行 SIL、HIL 测试的难点还在于检测机构难以拿到底层感知算法、决策控制算法的原始代码并无法获取充足的硬件接口协议支撑，因此 SIL、HIL 测试对检测机构的壁垒较高。

而整车在环测试，检测机构可以利用转毂平台、转向模拟器模拟车辆的实际动力学特性，通过场地标定试验就可以在测功机上模拟动力学特性，跨过了精确纵向动力学模型需求的壁垒，有利于展开全面测试与评价。

## 2.5 仿真测试通用要求标准化可行性

仿真测试通用要求标准化意义重大，为了我国自动驾驶行业的健康良性发展，标准化工作势在必行。通过本章对于行业现状与需求的梳理与分析，仿真测试通用要求标准化需求及其可行性分析对应如下表所示。

标准化对象	必要性	可行性	建议启动
-------	-----	-----	------

仿真测试的术语和定义	必要	近期可行	优先启动
仿真测试对象及其要求	必要	近期可行	优先启动
仿真测试的基本原则	必要	部分可行	
全面性		不可行：目前技术上仍无法通过量化指标的方式提出要求	不启动
真实性		可行：需通过大量试验验证的确定真实性指标	优先启动
可重复性		近期可行	优先启动

## 2.6 小结

建议立即启动 1、仿真测试的术语和定义； 2、仿真测试对象及其要求； 3、仿真测试的可重复性、真实性要求。

全国汽车标准化技术委员会智能网联汽车分技术委员会发布

## 3 自动驾驶功能仿真测试工具标准化研究

确保仿真精度、明确仿真接口、定义工具性能在仿真测试中愈发重要，为仿真测试工具制定合适的标准已成为自动驾驶测试过程不可或缺的重要内容。标准应从仿真测试工具出发，明确仿真工具各个模块要求，从总体出发指导内部子对象的具体功能。标准总体对象为广义语境下的仿真测试工具，涵盖了所有仿真测试过程中所需要使用到的具体工具，包含不同仿真工具的总体概括。标准的次级对象以不同的仿真过程为界限进行区分，根据软件在环测试、硬件在环测试、驾驶员在环测试、车辆在环测试的测试过程不同，明确不同仿真过程中所需工具的性能，为其所需的特有仿真工具，及相同仿真工具的不同功能进行标准化研究。

### 3.1 仿真测试工具标准化目的

当前尚未形成完善的智能网联汽车仿真测试体系，工具链作为仿真测试体系中的基础，应明确其标准从而为后续的具体测试内容奠定基础。当前市面存在的仿真测试工具之间存在着定义不明确、接口不统一、内容不完善、范围不明确等问题，直接导致了仿真工具之间协调性差、难以互用，严重阻碍了仿真测试体系的构建。仿真测试工具的标准化可以明确各仿真测试工具的测试内容、确定测试地位、规范测试边界、统一各平台输入输出接口，形成各仿真测试工具之间的数据共用，增加测试工具之间的协调性，从而推动完整的智能网联汽车仿真测试体系构建。

### 3.2 仿真测试工具概述

#### 3.2.1 软件在环测试

软件在环测试平台的要求主要包括两方面：仿真模型要求、仿真设施要求。仿真模型要求包括：

- (1) 仿真模型包括控制算法、交通模型、环境模型、车辆动力学模型、车辆感知系统模型；
- (2) 仿真模型应具备一定的精度，能够真实的反应物理系统的真实情况；
- (3) 仿真模型应能够以较快的运算速度进行运行；仿真模型应提供多层接口，

并与实际部件接口原理类似。

仿真模型应能够根据测试场景的不同以及测试车辆的不同进行实时切换。仿真设施要求包括：

- (1) 仿真设施包含仿真计算及配套仿真支撑软件；
- (2) 仿真设施的运算性能不低于运行该仿真测试的最低需求；
- (3) 仿真设施应具备实时存储功能以确保实验结果的有效存储；
- (4) 仿真设施的仿真步长应具备根据仿真需求实时调整的能力；
- (5) 仿真设施应提供 API 接口，供自动化测试软件进行测试流程控制；
- (6) 仿真系统应具备良好的稳定性，能够满足长时间不间断自动化测试的要求。

### 3.2.2 硬件在环测试

硬件在环测试的要求主要为测试设备的要求，包括：

- (1) 仿真设施主要包括上位机，下位机、仿真支撑软件及所测试的仿真硬件系统；
- (2) 仿真设施还应具备与仿真硬件系统之间相对应的连接接口，形成闭环；
- (3) 仿真硬件应能够模拟真实情况下的硬件系统工作情况，其误差必须控制在一定范围内；
- (4) 仿真硬件应与目标测试车型一致，其性能必须满足车载规范；
- (5) 仿真硬件的工作环境，安装位置，获取的模拟数据与实际工况相符；
- (6) 仿真硬件中控制器/控制模型应与仿真模型之间采用标准通讯协议（CAN、LIN、MOST、FlexRay、Ethernet 等）；
- (7) 控制器在环仿真中控制器应支持算法的更新与标定、应经过前期测试验证具备完整功能逻辑、应与目标车辆参数匹配。

### 3.2.3 驾驶员在环测试

驾驶员在环测试的工具要求包括：

- (1) 包含完整的车辆操作部件，包括方向盘、离合器、手刹、脚刹、油门、人机操作界面等一系列驾驶人可操作部件；
- (2) 具备完善的驾驶人状态检测系统，可检测驾驶人各项生理指标；
- (3) 视屏可模拟高仿真度车辆行驶环境，且行驶环境与真实环境应具有一致性，为驾驶人提供真实的驾驶体验；
- (4) 当检测人机交互系统性能时，人机交互系统的型号、安装位置、布置环境应与真实车辆相同。

### 3.2.4 车辆在环测试

车辆在环测试的工具要求包括：

- (1) 测试对象为完整的车辆系统，传感器，控制器和执行器均为真实物体系统，且以集成到整车之中；
- (2) 传感器通过物理系统获取感知信号，信号可以根据测试场景通过物体系统模拟传感器所需的感知信号，也可以通过实际系统根据实车状态和所需场景，搭建对应目标的物理系统，供传感器采集信号；
- (3) 车辆所处工况应与测试场景中的被测对象具有较高一致性；
- (4) 通过转鼓等实现车辆在可控环境下的动态测试，提高测试的有效性；
- (5) 采用转向力感模拟电机，运动平台等使得车辆给与驾驶员的反馈更加真实。

## 3.3 仿真测试软件要求

### 3.3.1 仿真软件应具备基本功能

仿真软件为智能网联汽车提供仿真测试环境，反馈传感器信息，并将自动驾驶算法接入虚拟环境之中。

其基本要求应包括：场景搭建功能，可提供静态环境模型、动态环境模型、天气模型等，可根据真实路网或高精地图搭建或生成大规模虚拟场景的道路环境模块；具备交通流生成功能，可以根据实际路测数据或参数化交通模型生成局部

微观交通流和宏观交通流；具备环境传感器模型，包括视觉传感器、超声波雷达、毫米波雷达、激光雷达等，既可以提供原始数据，也可以提供真值；具备输入输出接口，可与不同语言的自动驾驶算法互相调用；具备车辆动力学模型，模拟车辆在不同行驶状态时的动力学行为，根据 ADAS 或者自动驾驶系统的输入，结合路面特性对车辆本身进行仿真，完成闭环的测试；分布式案例存储和运行平台，可以通过添加硬件的方式大幅提高自动驾驶测试的里程数；具备数据收集功能，支持仿真案例回放；软件具备一定的接口，支持接入第三方软件进行联合仿真；具备动画显示模块，可显示车辆在虚拟环境中的行驶状态。

### 3.3.2 仿真软件性能现状

当前行业仿真测试软件百花齐放，各软件能实现的功能多样、模型精度不一，如 PanoSim、51VR、百度 Apollo、腾讯 TAD Sim、VTD、PreScan、Carmaker、Pro-SiVIC、SCANer、CARLA、ADChauffeur、Carsim、AirSim、Waymo Carcraft、赛目科技仿真平台、华为 octopus 八爪鱼等。

PanoSim 集高精度车辆动力学模型、汽车行驶环境模型、车载环境传感模型与交通模型等于一体，可与 Matlab / Simulink 无缝链接并支持离线与实时仿真功能。PanoSim 不仅包括复杂的车辆动力学模型、底盘（制动、转向和悬架）、轮胎、驾驶员、动力总成（发动机和变速箱）等模型，还支持各种典型驱动型式和悬架形式的大、中、小型轿车的建模以及仿真分析。它提供了三维数字虚拟试验场景建模与编辑功能，支持对道路及道路纹理、车道线、交通标识与设施、天气、夜景等汽车行驶环境的建模与编辑。

51VR 集多传感器仿真、交通流与智能体仿真、感知与决策仿真、自动驾驶行为训练于一体。基于物理特性的机理建模，可以通过 WorldEditor 快速地从无到有创建基于 OpenDRIVE 的路网，或者通过点云数据和地图影像等真实数据还原路网信息。51VR 支持在场景中自由地配置全局交通流、独立的交通智能体、对手车辆、行人等元素来构建动态场景，结合光照、天气等环境的模拟来呈现丰富多变虚拟世界。51 VR 内置了一系列场景库和测试案例库，包括开放区域真实场景、大规模城市道路、乡村道路、高速公路、停车场等。51VR 不但支持 Matlab 接入，还支持基于 ROS、Protobuf 的接口，方向盘、模拟器等人工驾驶接入。

Apollo 仿真平台是一个搭建在百度云和 Azure 的云服务，可以使用用户指定的 Apollo 版本在云端进行仿真测试。Apollo 仿真场景可分为 Worldsim 和 Logsim。Worldsim 是由人为预设的道路和障碍物构成的场景，可以作为单元测试简单高效的测试自动驾驶系统，而 Logsim 是由路测数据提取的场景，真实反映了实际交通环境中复杂多变的障碍物和交通状况。Apollo 仿真平台也提供了较为完善的场景通过判别系统，可以从交通规则，动力学行为和舒适度等方面对自动驾驶算法做出评价。

腾讯 TAD Sim 以高精度地图为基础，凭借腾讯的游戏引擎、虚拟现实、云游戏技术，集成工业级的车辆动力学模型和渲染引擎，辅以三维重建技术和虚实一体交通流，可实现自动驾驶感知、决策、控制等全部模块的闭环仿真验证。在仿真系统中，腾讯利用现实中采集的高精度地图模拟场景，并通过无人机和地面激光雷达扫描成像构建完整的 3D 环境。这意味着，仿真系统内除高精度地图外，外部激光点云及视觉信息同样包含在内。在车辆动力学模型方面，TAD Sim 可提供简易模型，并支持第三方模型及车厂自有模型。在交通流方面，基于高精度地图真实道路数据模拟交通流，腾讯模拟仿真系统可自设定编辑交通流，加入随机化、人工设定的交通流。

VTD 采用 OpenDRIVE、OpenCRG 和 OpenSCENARIO 标准，便于虚拟环境的重建和测试场景的开发，支持 OpenDRIVE 格式高精地图的导入，并基于此完成虚拟世界和环境的重建，现对道路和环境的模拟。具备或可扩展丰富的道路元素库，包括道路、交通标志、路面标线、交通灯、道路附属设施、道路周围建筑和树木等交通环境要素模型库；支持复杂路网快速建模，可以设置不同道路形态的模型，具备车道级数据的应用能力；支持交通仿真和真实工况的导入，支持和第三方车辆动力学软件的集成；支持物理级复杂传感器建模仿真，类型包括视频、超声波雷达、毫米波雷达和激光雷达等；场景库涵盖中国标准的道路交通标识与设施、植物、城镇建筑、乡村建筑、地标建筑、导流线、高速路出入口、交通灯、立交桥、隧道、桥梁等；具备典型的 3D 场景封装模块，包含 3D 场景和道路，并支持基于 3D 场景封装模块的拼接处理，实现基于场景模块的排列组合快速生成大范围场景；交通车辆均具备驾驶员模型和车辆动力学模型，驾驶员模型支持外部第三方车辆动力学软件的联合仿真。

Prescan 是一款基于物理模型的仿真平台，广泛用于汽车高级驾驶辅助系统 (ADAS) 和自动驾驶系统的开发，包括多种基于雷达、激光雷达、摄像头、GPS、V2V 和 V2I 通讯技术的智能驾驶应用。可以对道路模型进行设置与编辑，具备道路数据库设置坡度、曲率、侧倾、高架等，具备参数化得路面模型，支持自动化测试，支持非铺装路仿真，支持第三方地图 OSM/OpenDRIVE 高精地图导入；可以搭建环境模型，包括路面及路边设施数据库、交通标志数据库、建筑物、绿化带数据库、支持用户自定义 3D 模型导入；支持道路使用者的创建、编辑，包括轿车和摩托车、商用车、行人及自行车、测试用气球车等；支持天气、光照等天气条件的搭建，包括创建白天、黑夜雨雪雾天气、设置车灯及路灯等，光照模型具有传感器响应特性；支持多种类型传感器的模型建立与设置，包括摄像头、鱼眼 (fisheye)、单目、双目摄像头、毫米波雷达、激光雷达、超声波雷达、V2X 通讯传感器、车道线传感器、目标物体识别传感器等；支持 3D 车辆模型建模，包括  $x, y, z, roll, pitch, yaw$  六个自由度车辆状态计算，适用于 3D 路面仿真；配置驾驶人模型，根据理想路径以及车辆当前位置计算车辆转角信号输出；支持 Matlab/Simulink 输出输出，同时可直接引入 ECU 硬件。

Carmaker 是 IPG 公司开发的用于测试乘用车和轻型车辆的仿真解决方案，其可以在虚拟世界中准确建模真实的测试场景，并集成了车辆动力学模型、道路模型、驾驶人模型和交通流模型，可用于模型在环、软件在环、硬件在环、车辆在环的整个车辆开发过程。Carmaker 的车辆模型与 Carsim 精度一致，将车辆比作多体-非线性系统，并根据车辆子系统进行了清晰的设置（例如转向系统的 Pfeiffer 模型、制动系统模型、发动机模型）；Carmaker 道路模型可模型不平坦的道路（例如减速带、坑洼），支持 OpenCRG 格式的输入，并可从 HERE 地图直接导入真实道路环境；驾驶人模型可定义其驾驶风格（激进型、稳健型），可支持复杂的驾驶操作，并具有学习功能，可适应不同的车辆、道路特征；交通流模型可定义几乎无限数量的交通参与者，每个参与者都可添加动力学模型，并可根据事件对参与者进行精细控制。CarMaker 还具有开放性的毫米波雷达、摄像头、激光雷达、超声波雷达等多个高精度传感器模型；具有良好的实时性，具有自动化测试工具，并可以多核并行仿真测试，提高仿真测试效率。

SCANeR 是 AV Simulation 公司开发的用于 ADAS 和无人驾驶系统测试的仿真

软件，可构建车辆、交通场景、传感器、气候条件等模型，建立与真实场景相对应的高性能模拟环境，采用高性能算法加速有效里程测试，以实现高效的自动驾驶模型验证。SCANeR 的车辆动力学自带高精度的 Callas 模型，并具有丰富的 API 接口，可支持 Carsim、Simulink 等模型输入；传感器模型类型丰富，其功能性仿真由物理模型构成；道路模型可支持实际采集数据录入，并可以实现 HD Map 数据导入。SCANeR 配套的 SCANeR Explore 软件可进行测试方案的预先设计，通过 Python 语言定制化编辑场景参数，对参数进行合理约束，实现场景的自动衍生，批量执行，并对测试过程实时监控，测试结果准确分析。

CARLA 的开发包括从最基础的直到支持城市自动驾驶系统的开发、训练和验证。除了开源代码和协议，CARLA 还提供了为自动驾驶创建的开源数字资源（包括城市布局、建筑以及车辆）。平台能够支持传感套件和环境条件的灵活配置。支持不同天气状况，如晴天、雨天、雨后和晴朗等；支持不同传感器模式，如正常摄像头视觉、真实深度和真实语义分隔；提供测试场景资源库，包含 40 座不同的建筑，16 个运动汽车模型和 50 个行人模型。

ADChauffeur 仿真云平台，是为迎合智能网联汽车技术发展及仿真市场需求，研发的自主仿真软件。软件采用客户端与 WEB 端两种方式进行部署与应用，具备当前主流仿真软件具备的多种功能及创新功能。平台具备场景编辑器、场景生成器（满足 ASAM OPEN\*标准）、传感器与动力学仿真模型、交通流仿真、XIL 在环测试、集群管理、仿真上云等核心功能模块。平台具备兼容性接口，可外接第三方交通流、动力学、自动化测试等仿真软件。支持 OpenDRIVE、OpenSCENARIO 等格式文件解析及生成。全方位从驾驶场景大数据，仿真场景库，仿真测试到测试评价全链条仿真。涵盖了模型算法、软硬件、整车层级，并细化至传感器感知、决策及执行功能的仿真测试。

赛目科技仿真测试平台具备功能完整的算法测试能力，支持对自动驾驶系统的感知、决策、控制等算法进行测试；具备支持多种类型的测试场景的能力，包括城市道路、乡村道路、高速公路等环境；具备复杂交通场景快速构建和批量生成能力，主要包含道路和道路网络结构、道路路面和车道信息、地形、路边建筑物、可变的道路信息，信号灯、交通标识标线等；具备交通流仿真模拟能力；具备自然天气建模和渲染的能力，包括白天、夜晚、晴天、多云、阴天、雨、雪、

雾、沙尘等，具备天气条件和路面附着条件的关联能力，具备自然天气条件对传感器的关联能力，可实时模拟路面积水、积雪、雨水浸润镜头等；具备驾驶员、车辆动力学以及其他交通参与者的仿真建模能力；支持对测试过程的回放功能，支持对测试结果数据的下载功能。平台兼容目前主流建模工具，支持外部车辆动力学模型设置和导入，支持多种不同的高精地图格式导入，具备高并发测试的能力，能够同时模拟多台复杂模型的被测车辆，支持单个场景输入测试和路网连续里程测试等多种测试模式。

### 3.3.3 仿真模型与软件接口格式现状

#### 3.3.3.1 仿真模型

传感器模型包括摄像头、超声波雷达、毫米波雷达、激光雷达等。摄像头模型可实现图像的正常采集，畸变尽可能的小，精度需要通过棋盘图检验；超声波雷达模型可实现超声波探测功能，其探测角、探测宽度范围、最大量程与真实传感器的误差需要满足在一定范围内；毫米波雷达模型需要满足毫米波探测功能，其探测得到的前方障碍物位置、速度需要满足精度要求；激光雷达模型需要满足激光测距功能，其飞行时间、三角测距都需要满足精度要求。

车辆动力学模型是汽车仿真技术的重要组成部分，主要作用是模拟汽车在不同运动状态时的车辆动力学特性，模拟车辆通过不平路面的平顺性，模拟车辆运动时的横向加速度、纵向加速度，模拟车辆运动时的俯仰、侧倾。车辆动力学模型主要可以分为两类：基于整车拓扑结构，面向结构的仿真；基于汽车动力学理论，面向特性的仿真。

驾驶人模型在人-车-路闭环仿真系统中有着重要的应用，其主要用于在仿真环境中部分或全部代替真是驾驶员的操作行为，其控制响应与真实驾驶员的操作响应趋于一致。驾驶人模型主要分为三类：补偿跟随模型，基于车辆的实际轨迹与预期轨迹的偏差建立方向盘决策模型；预瞄跟随模型，基于真实驾驶员驾驶行为，考虑驾驶员前视作用；智能控制模型，基于智能控制的驾驶人模型。

### 3.3.3.2 软件接口格式

OSI (Open System Interconnection Reference Model) 将计算机网络体系结构(architecture) 划分为以下七层:物理层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层、应用层。物理层主要定义物理设备标准,如网线的接口类型、光纤的接口类型、各种传输介质的传输速率等,它的主要作用是传输比特流;数据链路层定义了如何让格式化数据以进行传输,以及如何让控制对物理介质的访问,这一层通常还提供错误检测和纠正,以确保数据的可靠传输;网络层定义 IP 地址,通过 IP 地址寻址;传输层用于将传输的数据进行封装;表示层用于解决不同系统之间的通信语法问题;应用层通过应用程序来完成网络用户的应用需求。

针对于智能驾驶仿真领域,目标通常的做法是基于传统网络的物理层、传输层等进行通信,各家软件定义自己的应用层内容,这就导致,各个软件之间通信困难,对接协议工作复杂,而且各个软件仿真的信号也不尽相同,这对自动驾驶仿真工作产生了极大的困扰。针对于这一问题,德国自动化及测量系统标准协会 (ASAM) 牵头开展了通用接口格式的研究与制定工作,命名为 OSI (Open Simulation Interface),用来连接自动驾驶功能的开发和各种自动驾驶模拟框架以实现兼容性,OSI 由两部分组成,包括 GroundTruth 和 SensorData,GroundTruth 是仿真框架中的一般目标输出,其以世界/大地为相对目标综合描述虚拟环境,包括统计传感器模型所需要的所有相关目标数据,SensorData 是统计学传感器模型的直接输入输出,它使用传感器坐标系,描述传感器的输出不确定性。目前该接口格式尚不完善,实时性不够,还在进一步开发中。

## 3.4 仿真测试硬件要求

### 3.4.1 仿真硬件应具备基本功能

仿真硬件主要包括计算平台、硬件在环仿真中的物理系统、驾驶员在环仿真中的物理系统、车辆在环仿真中的真实车辆。计算平台应具有三方面的基本性能:数据实时运算、数据存储以及数据的传输功能;其他真实物理系统的基本功能主要包括:规范的数据传输接口、与真实车辆相同的硬件配置、环境模拟硬件的实时性。

### 3.4.2 仿真硬件性能现状

仿真硬件主要应包含的性能要求包括：安装结构要求、运算频率要求、场景模拟真实性实时性要求、数据传输要求、存储要求。

硬件设备的安装结构应保证被测件与真实车辆行驶时的工作环境一致，被测件运行状态也应与真实情况下相同；硬件设备计算平台应保证足够的运算频率，保证被测件（算法）能够流畅运行；硬件设备的场景模拟真实性实时性要求环境模拟的硬件模块应充分满足传感器在环测试时传感器的工作状态，例如雷达的频率要求，超声波的回波要求，计算的实时要求；数据传输要求整个系统的数据传输可以满足各组件之间的最大数据收发要求；硬件设备应具有存储功能，对试验数据进行存储。

上位机设备贯穿仿真测试的各个环节，为仿真测试提供算法运行平台、配备运行环境。上位机根据测试客户需要可以自行进行配置升级，理论上通过并行处理等方式可以将上位机性能不断提升。当前一些软件平台对上位机的性能提出了一些基础要求，例如 Panosim 软件要求上位机达到：64-bit Windows 7, 64-bit Windows 8.1 or 64-bit Windows 10、 Intel CPU Core i7-3770 or AMD equivalent、8 GB RAM、Nvidia GPU GeForce GTX 970 / AMD GPU Radeon RX 480；monoDrive 要求上位机达到： i9900 (8 core)、32 GB 3.2GHz RAM、2 RTX 2080 GPU、 water cooler、 overlock by 50%、 Windows 10、 Labview2019、 monoDriveClient, monoDrive Simulator。

实时机即快速控制原型，是现代电控系统 V 型开发与测试流程中的一个早期开发验证环节，其主要目的是以原型系统代替尚未定型发布的量产电控系统，快速方便地对新开发或升级的软件模块进行应用层功能逻辑验证。与一般汽车嵌入式电控系统不同，当前 ADAS 应用中特别存在有感知融合层，其要求将多个环境传感器所侦测的环境信息进行数据融合，以实现环境模型的构建，为后续的策略控制层提供条件输入。当前针对实时机的要求可推导为：1) 通过给定的汽车总线接口（本方案中需求的是 CAN、LIN 或以太网），获取摄像头、雷达等传感器反馈的 Object List；可能通过以太网接口获取环境感知传感器的原始数据（如：摄像头视频帧、雷达点云矩阵等）；2) 对来自总线的原始报文数据进行

解析，提取有效数据负载——Object List；3) 对来自总线的传感器原始数据进行预处理（如：图像灰度化、模糊化等），实现对原始数据的语义提取，从而生成 Object List 输出的一系列处理过程；4) 提供适宜的软件开发环境，以进行 Object List 的融合算法实现；5) 提供适宜的数据接口，使融合后的结果可以被传输至后续决策控制层作为输入使用。

感知模拟配套设备指为车辆传感器提供模拟仿真信息的相关设备。由于智能网联汽车配备大量的感知传感器，针对这些传感器进行仿真测试时需要通过一定的方式将传感器发出的原始信号进行屏蔽吸收，并根据模拟产生的场景向其发送虚拟的模拟信息，这些相关设备组成的整体即为感知模拟配套设备。由于车辆装载传感器型号的不同，需要不同的感知模拟配套设备为这些传感器提供虚拟的模拟环境信息，当前已经产品化的相关设备包括毫米波雷达回波模拟设备、摄像头投屏设备、视频注入设备、超声波雷达回波模拟设备、V2X 信道模拟设备。

### 3.4.3 仿真硬件通信接口现状

各仿真硬件间的通信主要通过 CAN、LIN、以太网线连接。

## 3.5 仿真测试工具标准化可行性

当前行业应用的仿真测试工具多样功能不一，通过本章对于行业现状与需求的梳理与分析，仿真测试工具标准化需求及其可行性分析对应如下表所示。

标准化对象	必要性	可行性	建议启动
仿真模型精度要求	必要	近期不可行：由于仿真模型在各企业应用阶段与应用目的不同，且当前技术路线无法统一，定义仿真模型的精度要求尚有难度。	推迟启动
仿真测试工具之间及仿真工具内部的数据传输接口	必要	近期不可行：当前国际上已有部分应用较广的团体性接口格式，但国内尚不具备自主知识产权的接口格式，不具备标准化的基础。	推迟启动
仿真测试工具性能要求	必要	近期不可行：目前行业对仿真测试工具的需求差异性较大，且各仿真工具各具特色，依据现有经验尚无法系统性评价其优劣，尚不具备标准化的基础。	推迟启动

### 3.6 小结

暂不制定自动驾驶功能仿真测试工具标准，待技术成熟后再启动相关工作。

全国汽车标准化技术委员会智能网联汽车分技术委员会发布

## 4 自动驾驶功能仿真测试场景标准化研究

### 4.1 仿真测试场景标准化目的

场景是仿真体系的开端，它在整个体系扮演着极其重要的角色。而且随着仿真系统和评价体系的逐渐完善，场景在整个体系中扮演的角色也愈加重要。场景本质是对自动驾驶相关数据的一种价值提炼，是发挥数据价值的必须且高效的途径之一。基于场景的测试方法可以弥补基于里程的测试方法的局限性，在提高系统开发效率、产品落地效率方面都有重要作用。

仿真测试场景的建立需要大量的资源投入，我国各个企业相继启动研究项目对其展开研究，但当前各个企业相关仿真测试场景技术的研究存在较大差异，其中差异主要存在于场景设计要素、场景评价及要求、场景数据和格式、场景分类四个方面。

- (1) 场景是车辆与交通环境中其他车辆、设施、环境、道路等元素综合交互的过程，各个场景元素组合得到不同场景的集合，元素划分的正确性会直接影响到测试场景的全面性、有效性、真实性，以及场景存储、管理的方便性。目前各企业对场景设计元素的划分方法也是大相径庭，这使得构建出的测试场景五花八门，且很难对其进行统一的管理和使用，这严重阻碍了测试场景构建和使用标准化工作的开展。
- (2) 场景是测试的必要输入，测试场景的全面性会影响到测试的覆盖率，测试场景质量的高低会影响到测试效率以及测试结果的有效性，测试场景的合理性会影响到测试结果的真实性，那么考量测试场景是否全面，是否覆盖功能 ODD，是否基于真实的道路交通场景，是否具有代表性，是否有较好的测试维度等就显得尤为重要。
- (3) 场景数据转化是仿真测试的必要过程，其为仿真场景不可或缺的部分，当前存在多种不同的测试场景描述格式，例如 OpenX 格式、OSM 格式、json 格式、Apollo OpenDRIVE 格式等，场景格式的差异限制了不同仿真工具之间的通用，阻碍了测试场景的兼容、共享，给企业的仿真测试工作带来了一定的局限性；
- (4) 不同的开发阶段所对应的场景定义也不一样，概念阶段应该用自然语言

对场景进行描述，系统开发阶段场景应该包括用于场景表示状态值的参数范围(定义状态值边界)，测试阶段场景应该对每个状态值单独取值。场景在不同层级的正确定义和分类会影响企业对场景的理解，从而后续场景数据库的管理、使用等等。

仿真测试场景标准化的目的包括：

- (1) 通过仿真测试场景设计元素的标准化，提升行业仿真测试的场景设计一致性和场景覆盖度，从而提升自动驾驶控制系统运行稳定性，保障道路行车安全及自动驾驶产业平稳发展；
- (2) 通过场景评价及要求的标准化，提高场景的设计质量，提升场景的使用价值，从而有效地验证自动驾驶功能，促进自动驾驶技术的快速迭代发展。
- (3) 通过交通场景数据及格式的标准化，提升数据库在不同企业间的通用性，提升测试场景库在不同仿真测试系统间的可移植性，从而降低测试系统切换带来的人力物力成本损耗。
- (4) 通过场景管理的标准化，建立企业对自动驾驶测试场景的统一管理和规范，从而更好的支持仿真测试工作。

## 4.2 仿真测试场景设计方法

### 4.2.1 数据来源

对数据来源进行分类，可将场景概况为五类：自然驾驶数据场景、危险工况场景、法规场景、设计场景、重构场景。

自然驾驶数据场景主要来源于通过设备采集的由人类驾驶车辆产生的数据生成的场景，包括驾驶场景数据库中的场景以及企业的道路测试场景。

危险工况场景主要包括恶劣天气环境、复杂道路交通以及典型交通事故场景。恶劣天气环境包括大雨、大雾、大雪、雾霾、强烈逆光等可能使自动驾驶传感器功能受限的环境，以及结冰、积雪、横风等可能影响自动驾驶系统操纵控制的环境。复杂道路交通场景，包括多车道选择、环岛、交通拥堵、多层立体交通枢纽等场景。典型交通事故场景通过对交通事故数据库的交通事故进行建模，重现交

通事故发生前的场景。

标准法规测试场景是自动驾驶功能在研发和认证阶段需要满足的基本场景，始终紧跟自动驾驶政策发展动态，可基于 ISO、NHTSA、ENCAP、CNCAP 等多项标准、评价规程构建 20 余种标准仿真测试场景。

设计场景由各自动驾驶企业跟踪各自自动驾驶 ODD 设计形成的仿真测试场景。

重构场景即将仿真场景模块化，将一个仿真场景分解多个模块，通过各个模块参数在符合场景逻辑的排列组合随机生成或自动重组，进而补充大量未知工况的测试场景，有效覆盖自动驾驶功能测试盲区。

#### 4.2.2 场景要素

目前仿真场景普遍沿用一般场景要素分类模型，如图 14 所示是德国 PEGASUS 项目提出的场景六层模型，具体内容如下所示：

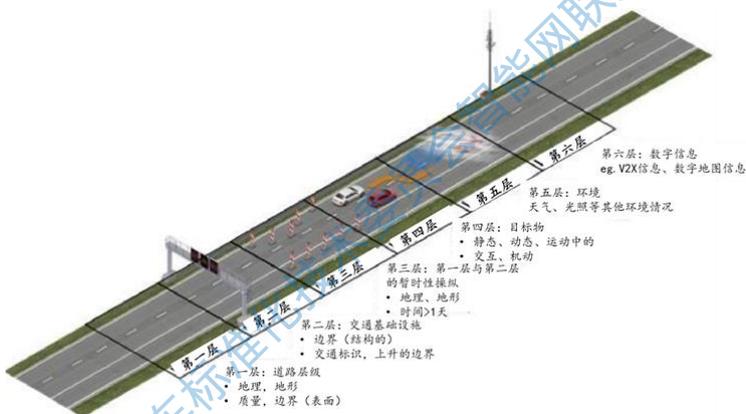


图 14 PEGASUS 六层模型

- (1) 道路：几何结构，路面质量、边界（路面）；
- (2) 基础设施：边界（结构），标志牌、信号灯等；
- (3) 暂时性操纵：道路的临时性设施，如临时封路、道路施工现场等；
- (4) 目标物：交通参与者状态、行为等；
- (5) 自然环境：天气、光照等其他环境信息；
- (6) 数字信息：数字信息，如 V2X 信息、数字地图信息等。

此外，也有部分企业按照相对大地的移动性，将仿真场景要素划分为静态元素、环境条件因素和动态元素，如下：

静态元素通常包括道路类型（主车道、主从车道等）、道路表面（摩擦系数、材质等）、道路几何（曲率、坡度、交叉口）、交通标志（交通灯与交通标志牌）、道路设施元素（包括隧道、车站、立交桥、收费站，施工路段）等。每一个静态要素包含几何信息（如大小/形状/位置等）、物理属性（如速度、方向、反射率、物理形态、疏密度等）和图像属性信息（如表面不平度、纹理、材质等）。

环境条件信息主要包括天气、光照和连接性等，其中，天气元素包括晴天、雨天、雪天等不同天气类型以及不同能见度等信息，光照指不同光照度下的环境，如：艳阳天、夜晚、黄昏、不同灯光照射下的环境等。连接性指自车所处环境的网络连接性，V2X 连接性以及是否支持高精地图等特性。天气主要包含强度，方位，方向等属性。

动态元素主要包括交通情况，机动车、非机动车、行人、障碍物、动物等。除了几何信息和物理属性，还有行为属性（如起步、停车、右转等）。

#### 4.2.3 设计方法

仿真测试场景的设计方法，普遍沿用一般场景的设计方法，参考 PEGASUS，场景构建主要分为三个阶段，分别为功能场景（Functional scenarios）、逻辑场景（Logical scenarios）和具体场景（Concrete scenarios），如下：

功能场景：融合道路信息、本车信息、交通参与者信息、环境信息，以文字的形式将功能场景进行具体描述，考虑并设计不同场景范围下的场景元素；

逻辑场景：基于真实采集数据，事故数据，标准法规数据和专家经验数据等数据来源选取参数，对功能场景包含信息变量化并赋予相应的参数空间范围；

具体场景：基于参数范围通过选取具体参数构建具体场景得到测试用例。

下表以前方乘用车向左变道场景举例：

场景阶段性构建	说明	例子
前方乘用车向左变道		
功能场景	融合道路信息、本车信息、交通参与者信息、环境信息，以文字的形式将功能场景进行具体描述。	道路类型-四车道快速路 道路几何-直线道路 本车-最右侧车道，本车道行驶 前车-最右侧车道，本车车前，向左变道 环境条件：白天，晴天

逻辑场景	对功能场景包含信息变量化，并赋予相应的参数值空间范围。	道路类型：四车道快速路，2.5m~3.75m 本车：纵向速度：70~90km/h 前车：在本车前方（100m~200m） 向左变道（纵向速度：70~90km/h，横向加速度：1~2m/s <sup>2</sup> ） 环境条件：晴天，白天（光照>1000lux）
具体场景	定义场景变量具体的参数值。	道路类型：四车道快速路，3m 本车：纵向速度：70km/h 前车：在本车前方（200m） 向左变道（纵向速度：70km/h，横向加速度：2m/s <sup>2</sup> ） 环境条件：晴天，白天（光照：2000lux）

应用于仿真测试的场景通常为具体场景即具体测试用例。

根据不同的测试目的，可以生成不同的测试场景，如普通测试场景在设计的合理范围内，选择典型参数或等价参数建立测试场景；边界场景根据设计的边界条件，选择边界内和边界外的参数建立测试场景；故障场景即刻意引入一些故障条件来建立测试场景。

另一方面，目前国内车企在设计场景时通常会考虑一些中国特色的场景，如静态场景中，中国典型的鱼骨线标志、限重标志，潮汐车道和复杂高架桥，动态场景中，老人代步车，电动二轮车，三轮快递车以及中国特色的车辆切入行为。中国高精地图等也应该纳入中国特色化的场景考量中。

### 4.3 仿真测试场景评价方法

对场景的评价，需要从宏观和微观两个层次进行考虑，宏观层面主要针对场景序列，主要评价场景序列的覆盖度。微观层面主要针对单个场景，主要评价该场景的真实度、规范性和代表性。

#### 4.3.1 覆盖度评价

场景的覆盖度评价主要针对的是场景序列进行评价，结合其设计运行范围ODD、仿真目的一起考虑，而不是孤立进行评价。如下：

场景库的覆盖度应与自动驾驶系统的ODD匹配。设计运行范围(ODD)，指设计时确定的驾驶自动化功能的外部环境。不同的厂商根据自身对于自动驾驶系统商业化应用，以及自身技术能力的情况，对系统的ODD进行个性化的定义。但从不

同的 ODD 定义中可以梳理出几类比较典型的 ODD，包括：城市道路，高速道路，泊车场景，郊区和封闭园区五类典型 ODD 范围。仿真场景应从预期的 ODD 中选择，进一步考虑该场景序列对 ODD 的覆盖度。例如：对 L3 TJP 而言，基于其 ODD 定义，可知以下功能场景应被列入考虑范围，并评估其覆盖度：在同一车道有前车，相邻车道有车辆跟随情况下进行车道保持；前车变道后，本车道有静态障碍物，等等。

场景库的覆盖度应与仿真的目的匹配。仿真的目的，大致可以分为两类：帮助研发具有鲁棒性的自动驾驶功能，以及对功能进行测试验证和确认。用于研发目的的仿真，主要作用是增加测试的覆盖率；而用于确认的仿真，则服务于整体的测试目的，并能提高系统安全的置信度。

用于研发目的的仿真场景库，通过考察场景库中场景分类及场景系数的分布范围，对现有 CIDAS 等交通事故数据库，自行采集的路试数据，法规标准数据库，边缘场景库以及其他可获取的数据进行分类及参数提取，检查场景库中类别及参数分布能否完全覆盖上述场景数据，以此评价场景库的覆盖度。

用于测试的仿真场景库，应能检测车辆的基本行驶能力，车辆在安全环境下的行驶能力，车辆在危险和失效场景下的行驶能力等，举例来说：用于功能安全测试的仿真场景，应包含以下来源的输入：

- (1) 安全设计中可测试的安全需求；
- (2) 真实世界测试中遇到的有挑战的场景；
- (3) 真实世界驾驶系统收集的场景；
- (4) 真实世界中单个驾驶员的碰撞事故场景；
- (5) ODD 中道路基础设施变量的系统性列举；
- (6) 基于系统弱点的工程知识识别出的挑战性场景。

#### 4.3.2 真实度评价

真实度评价主要是对生成的单个场景进行评价，要求场景要素齐全且合理，关键模型和参数置信度空间合理等。

场景要素齐全且合理依据自然驾驶数据中现实世界交通行为和数据的统计

和分析，考虑系统的 ODD 定义以及仿真目的，判断场景要素是否完整且合理。

其次，仿真模型和参数的合理性，也是场景库真实性的一个重要维度。例如：传感器模型是否能复现真实传感器的物理特性，模型参数的分布是否符合物理世界的实际情况等。

另一方面，对于自动驾驶地图，需要符合相关管理部门的以下要求：

《导航电子地图安全处理技术基本要求》（GB20263-2006）：导航电子地图在公开出版、销售、传播、展示和使用前，必须进行空间位置技术处理。

《关于加强自动驾驶地图生产测试与应用管理的通知》：自动驾驶地图属于导航电子地图的新型种类和重要组成部分。

因此自动驾驶地图信息，及 GNSS 位置信息，均应在 GCJ02 坐标系下进行表达。在仿真时与 ground truth 的真实度，应进行额外评估。

#### 4.3.3 规范性评价

出于追溯性和可维护性的考虑，仿真的结果应该是可以复现的。这意味着对于给定的初始条件，输入数据和随机种子，仿真器将输出一致的结果。所以，仿真场景应该符合规范性的要求，应该支持仿真结果可复现的要求。仿真工具的结果应由统一规范的数据结构保存，以提高可追溯性。

#### 4.3.4 代表性评价

场景的代表性主要是评价单个场景的质量，从而去除冗余、质量低的场景，保留质量高有代表性的场景，提高场景的质量。

场景的代表性可从以下几个维度进行考虑：

- (1) 场景出现概率（比如，在真实世界中出现的概率，在 ODD 中出现的概率）；
- (2) 场景评测项目覆盖度（能够评估哪些自动驾驶指标）；
- (3) 场景评测可信度（被造假的容易度，比如，对于一个简单场景，很容易通过造假满足）；
- (4) 危险场景出现概率（一个危险场景，最好能够比较频繁的出现典型危险场景，这样可以最大化的利用该场景评测相关指标）；

- (5) 场景的复杂度，如交通流及环境的复杂度、场景中包含中国特色场景的复杂度。

## 4.4 仿真测试场景管理方法

### 4.4.1 场景库构建

第一步，确定单个仿真场景的数据储存方式与标准，统一各种来源的仿真测试场景的表现形式；

第二步，基于对功能 ODD 及故障模式的理解，对场景中所有可能的元素进行组合，确定场景分类，将该分类与各种交通事故数据库中场景进行比对，校验场景分类的覆盖度。

第三步，对各种来源的场景进行分解提炼，确定每个场景所组成的模块，如天气条件，道路条件，交通流条件，本车驾驶任务等模块，将场景模块化。

第四步，获取实际交通数据后，通过提取交通流轨迹，并利用统计分析得到交通流的特征参数的分布范围。针对道路及路上附属物等数据，则需要依据相关法规确定场景参数。

第五步，通过对各个模块所定义的场景参数进行随机组合或穷举，形成更充实的场景，完善场景库。

### 4.4.2 场景库更新

由于测试过程或运行过程中难免会发现新的危险场景，或随着采集到的交通流数据不断增多，可能会发现场景参数的分布范围发生变化，此时需要启动场景库的变更过程。

第一步，分析新场景能否被当前场景库类别覆盖，如新场景超出了场景库定义类别范围，则需要重新定义场景库分类，如新场景没有超出场景库定义的类别范围，则需要变更场景库场景参数分布范围。

第二步，识别存在变更的部分，重新进行覆盖度评估，并标注新增未测场景。

将场景用多个字段的固定格式描述并在筛选后赋予每个场景唯一的 ID，存储为功能场景集，使用表格方式来管理场景集，通过场景唯一 ID 来识别和调用

场景。

#### 4.4.3 场景库检索结构

目前相对通用的场景库检索结构如下：

第一步，根据被测对象，分析被测对象适用的场景的分类，如功能分类，道路类型分类，天气分类等。

第二步，通过单分类检索或多分类组合检索的方式，获取场景库中对应分类的场景。

第三步，筛选检索所得的场景，排除可能存在的与被测对象不符的场景。

第四步，获得对应的测试用例集。

#### 4.5 仿真测试场景数据格式

##### 4.5.1 静态仿真场景数据格式

场景静态要素主要由道路设施要素组成，其包括路网拓扑结构、道路几何特征、道路表面材质、车道线、路面标识、交通灯牌、街边建筑、特殊部分（慢车道、施工、匝道、桥梁、隧道）等部分。

静态要素	属性
路网拓扑	道路数目、道路编号、交叉口
道路特征	起点/终点、车道数、车道宽、曲率半径、坡度
道路表面特质	材料、粗糙度、纹理、反射特性
车道线	线型、宽度、颜色、
路面标识	交通标志、标线
交通灯牌	朝向、位置、信息、切换时间
街边建筑	物质、尺寸、表面属性
道路设施	护栏（高度，形状等），硬路肩，隔离带等
特殊部分	慢车道、施工、匝道、桥梁、隧道

常用的静态仿真场景数据格式主要有 OpenDRIVE 格式、OpenCRG、RoadXML 格式和 OSM 格式。

OpenCRG 是描述路面状态的格式性文件，其描述内容包括路面不平度、摩擦系数等。

OpenDRIVE 格式由德国自动化及测量系统标准协会（ASAM）制定，是一种开

源的道路网逻辑描述格式标准，其文件格式为 XML，包含了 Road、Junction、station 等诸多道路路网信息，使用 WGS-84 地理坐标系，其包含车道几乎所有描述信息，包括车道形状、车道数、车道交叉、车道偏置、车道横截面形状、限速信息等。其结构层级最多可分为 8 层，上 3 层的数据结构如表所示。

结构名称	层级	父级	解释
OpenDRIVE	0	-	-
-header	1	OpenDRIVE	文件头标签，包含版本属性
-geoReference	2	header	参考地理坐标系
-road	1	OpenDRIVE	道路接口描述
-link	2	road	道路连接
-type	2	road	道路类型，如机动车道、人行道
-planView	2	road	道路几何轨迹，如直线、弧线等
-elevationProfile	2	road	道路海拔高度
-lateralProfile	2	road	道路横向轮廓
-lanes	2	road	车道定义
-objects	2	road	道路目标物描述
-signals	2	road	交通信号描述
-surface	2	road	道路路面描述
-railroad	2	road	铁路描述
-controller	1	OpenDRIVE	控制器，用于控制信号灯等
-control	2	controller	控制对象描述
-junction	1	OpenDRIVE	交叉路口
-connection	2	junction	交叉路口连接描述
-priority	2	junction	优先级
-controller	2	junction	交叉路口的控制器
-junctionGroup	1	OpenDRIVE	交叉路口集，如环岛
-junctionReference	2	junctionGroup	交叉路口集中引用的交叉路口
-station	1	OpenDRIVE	车站，如公交车站
-platform	2	station	站台描述

从 OpenDRIVE 路网拓扑可以看出，其顶层主要有道路（road）、控制器（controller）、交叉口（junction）、交叉口组（junctiongroup）等组成。例如图为 OpenDRIVE 标准中定义的 junction 场景（左），以及通过 VTD 仿真器构建的高精度十字路口（右）。

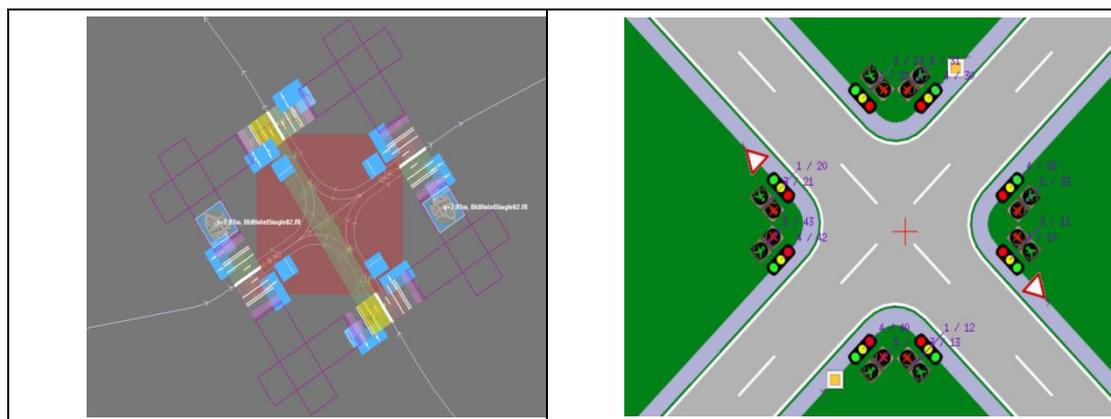


图 15 OpenDRIVE 交叉口示例

此外，百度在 OpenDRIVE 的基础上做了部分修改与扩充，形成了 Apollo OpenDRIVE 格式，主要改动和扩展了以下几个方面：地图元素形状的表述方式，以车道边界为例，标准 OpenDRIVE 采用基于 Reference Line 的曲线方程和偏移的方式来表达边界形状，而 Apollo OpenDRIVE 采用绝对坐标序列的方式描述边界形状；元素类型的扩展，例如新增了对于禁停区、人行横道、减速带等元素的独立描述；扩展了对于元素之间相互关系的描述，比如新增了 junction 与 junction 内元素的关联关系等；配合无人驾驶算法的扩展，比如增加了车道中心线到真实道路边界的距离、停止线与红绿灯的关联关系等。

RoadXML 是 1994 年由法国标致雪铁龙、雷诺等几家学术和工业伙伴开发的用于描述道路逻辑的标准格式，用于增强模拟器之间的互操作性。RoadXML 解决了智能驾驶仿真应用中几个关键问题：交通参与物描述、仿真场景的控制、车辆动力学建模、声音控制与 3 维路网生成。

RoadXML 对交通环境提供了多层描述，用于实时应用程序的快速数据访问，例如图 16 所示。以下是四个主要层次的信息：

拓扑层：描述元素在路网中的位置和连接关系；

逻辑层：描述元素在道路环境中的意义；

物理层：描述元素的属性(路面或障碍物)；

可视化层：描述元素的几何形状和三维表征。

目前 SCANer 采用了 RoadXML 格式用于设计仿真场景，如图 16 所示。

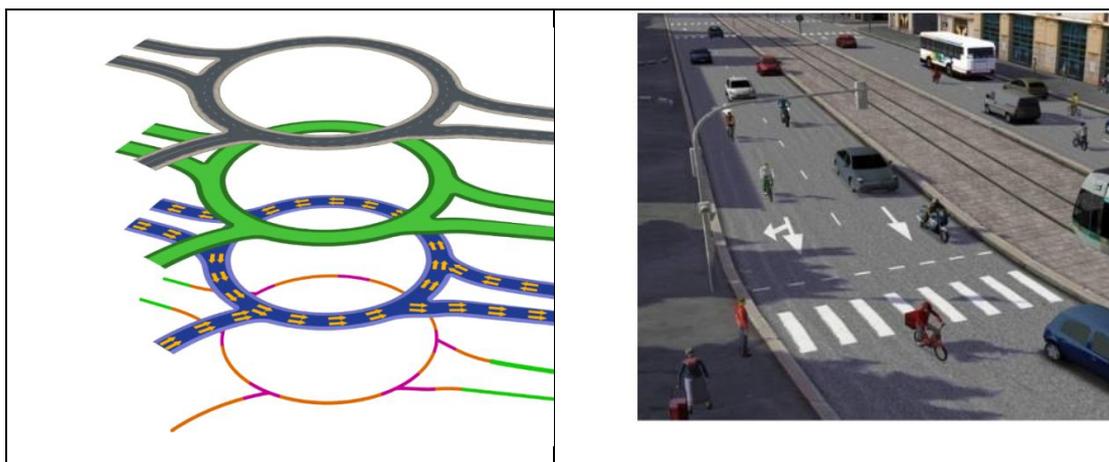


图 16 RoadXML 路网层次与应用效果

OSM 格式：OSM 是 OpenStreetMap 简称，其元素（数据基元）主要包括三种：点（Nodes）、路（Ways）和关系（Relations），这三种原始构成了整个地图画面。其中，Nodes 定义了空间中点的位置；Ways 定义了线或区域；Relations（可选的）定义了元素间的关系。Node 通过经纬度定义了一个地理坐标点，还可以用 height=\* 标示物体所海拔，通过 layer=\* 和 level=\* 标示物体所在的地图层面与所在建筑物内的层数，通过 place=\* and name=\* 来表示对象的名称。Way 是通过多个点（node）连接成线（面）来构成的，通过 2-2000 个点（nodes）构成了 Way，对于超过 2000 nodes 的 Way，可以通过分割来处理。Way 可表示 3 种图形事物（非闭合线、闭合线、区域），非闭合线是收尾不闭合的线段，通常可用于表示现实中的道路、河流、铁路等；闭合线是收尾相连的线，可以表示现实中的环线地铁；区域是闭合区域，通常使用 landuse=\* 来标示区域。一个 Relation 可由一系列 nodes, ways 或者其他的 Relations 来组成，相互的关系通过 role 来定义。一个元素可以在 Relation 中被多次使用，而一个 Relation 可以包含其他的 Relation。

#### 4.5.2 动态仿真场景数据格式

动态场景数据主要是用于描述交通参与者行为动作的数据，其中应包含以下部分：

动态要素	属性
交通特性	密度、速度、人车分布
自行车	几何模型、类型、运动参数、运动路线等
机动车	类型，交互动态、运动参数、几何模型

行人, 动物	类型, 交互动态、表面属性、动作姿势
--------	--------------------

常用的动态仿真场景数据格式主要有 OpenSCENARIO 格式。

OpenSCENARIO 由德国自动化及测量系统标准协会 (ASAM) 制定, 是针对智能仿真动态场景的标准化描述, 其主要用例是描述涉及多个实体 (如车辆、行人和其他交通参与者) 的复杂、同步的操作, 对驾驶机动的描述可以基于驾驶员的动作 (例如执行车道改变) 或基于轨迹 (例如来自记录的驾驶机动), OpenSCENARIO 还包括其他内容, 如对自我车辆的描述、驾驶员外观、行人、交通和环境条件等, 其还描述了事件板中的车辆操作, 按事件、动作和序列细分。

#### 4.5.3 环境场景数据

环境场景数据主要包括天气类型, 光照能见度等数据, 其中应包括以下部分:

环境数据	属性
光照	强度、颜色、方位
雾/霾	包括能见度、范围、湿度、密度、反射衰减
雨雪	降水量、湿度、反射衰减
风	强度、方向
云	相对位置

当前行业中尚无通用的环境场景数据格式。在后续 ASAM OpenSCENARIO 标准中计划纳入该部分描述数据。

#### 4.6 仿真测试场景标准化可行性

自动驾驶仿真测试场景当前存在场景设计元素不统一、场景分类不一致、测试场景质量参差不齐、仿真测试场景格式不统一等问题, 尚未形成行业所需的自动驾驶仿真测试场景库, 阻碍了自动驾驶仿真测试的进一步发展。通过本章对于行业现状与需求的梳理与分析, 仿真测试场景标准化需求及其可行性分析对应如下表所示。

标准化对象	必要性	可行性	建议启动
仿真测试场景设计方法	必要	近期可行: 目前 ISO 已经在制定相关标准, 中国将深入参与, 待国际标准发布后, 适时进行国标	推迟启动

		转化。	
自动驾驶功能基础仿真测试场景	必要	近期可行	优先启动
仿真测试场景评价方法	必要	不可行：仿真测试场景的精度要求、覆盖范围等的评价指标在技术上暂时不可行，不具备标准化的基础。	不启动
仿真测试场景管理方法	必要	近期不可行：目前行业仅有少数企业对仿真场景库建立了系统性的更新管理和检索规范，尚不具备标准化的基础。	推迟启动
仿真测试场景数据格式	必要	不可行：当前国际上已有部分应用较广的团体性场景数据格式，但国内尚不具备自主知识产权的场景数据格式，不具备标准化的基础。	不启动

#### 4.7 小结

建议立即启动自动驾驶功能基础仿真测试场景的标准化工作。

## 5 自动驾驶功能仿真测试流程与评价方法标准化研究

### 5.1 仿真测试试验流程标准化目的

通过定义开发、认证和规范管理自动驾驶仿真测试所需要的流程及其要求，在仿真测试流程关键步骤、数据存储、评价体系方面形成统一的标准规范，发挥标准在自动驾驶仿真测试体系构建中的顶层设计和基础引领作用，为打造自主可控、具有核心技术、开放协同的自动驾驶仿真测试产业提供支撑，并为推动中国标准取得国际话语权提供基础。参考自动驾驶及仿真测试技术现状、产业应用需要及未来发展趋势，可以从如下几方面具体阐述：

#### 1) 构建科学合理的仿真测试流程的框架体系

自动驾驶仿真测试流程体系，应满足当前驾驶自动化系统仿真测试需求，并为驾驶自动化系统的仿真测试提供指导依据。为此，需要对仿真测试进行分解，在自动驾驶的模型算法、软件测试、硬件测试、整车测试过程中，分配测试流程、数据存储分析、结果评价的具体操作要求，从而保证仿真测试结果与实车测试结果的一致性，保证自动驾驶系统的算法模型、零部件、系统和整车都能够完整的测试，保障测试结果的科学性、规范性、准确性，满足自动驾驶系统测试的性能和安全要求。

#### 2) 推动仿真测试行业的规范管理

通过建立标准体系的方式形成行业操作规范，统一仿真测试相关的机构、自动驾驶研发企业、零部件供应商和测试机构在测试过程中的测试流程、数据、评价方法，形成一致性、规范性、通用性的测评结果，提高自动驾驶企业的研发效率，减少安全隐患，推动测评监管和法律管控，促进行业知识的积累和共享。

#### 3) 应对中国国情需求

中国的智能网联汽车行业发展，具有自身特色。在自动驾驶技术路线上，同时考虑智能化和网联化两条路径；在道路交通上，中国正处于机动化、城镇化快速交织发展时，路况差异大；核心技术和零配件尚掌握在跨国巨头和测评机构手中，国内整车企业、汽车零配件、仿真测试企业正在加紧对接国际最新的标准规范，努力缩小技术差距。通过建设适合国际标准同时满足国情要求的仿真测试流程标准体系，能够规范和引领行业技术发展，满足市场需要。

#### 4) 对接智能网联汽车国际标准

国际标准化组织已经制定了智能网联汽车标准化体系中的部分通用标准，部分关键技术标准正在制定中，其中多项涉及性能要求、试验方法和评价方法，如汽车前撞预警（ISO 15623）、车道偏离预警（ISO 17361）、自适应巡航（ISO 15622）、交叉口信号信息与违规警告系统（ISO 26684）、碰撞事故自动报警系统（ISO 24978）、自动驾驶测试场景工程框架与流程等。在仿真测试流程和评价方法方面对接国际标准，能够促进国内智能网联汽车产业在研发、测试环节夯实国家化基础，为拓展国际市场铺平道路。

## 5.2 仿真测试流程及要求

### 5.2.1 典型仿真测试流程及要求

现阶段，自动驾驶系统主要包括：环境感知系统、决策规划系统和控制执行系统，外界环境信息和车辆动态信息通过感知系统收集，通过通讯接口传输到决策系统运算，生成操作指令输出控制系统，控制车辆各组件运行，如加速、转向等，从而实现自动驾驶功能。对上述系统开展仿真测试，需要开展对自动驾驶算法、组件及系统集成的测试，保证整体性能满足设计和安全法规要求。按照自动驾驶系统的研发周期，仿真测试分为模型在环、软件在环、硬件在环、驾驶员在环和车辆在环五个测试阶段，各阶段原则上采用递进的方式执行，也可根据实际需求并行执行，在每一个阶段均涉及自动驾驶的三个主要组成系统测试。

目前主要的仿真测试阶段的层次关系如图 17：

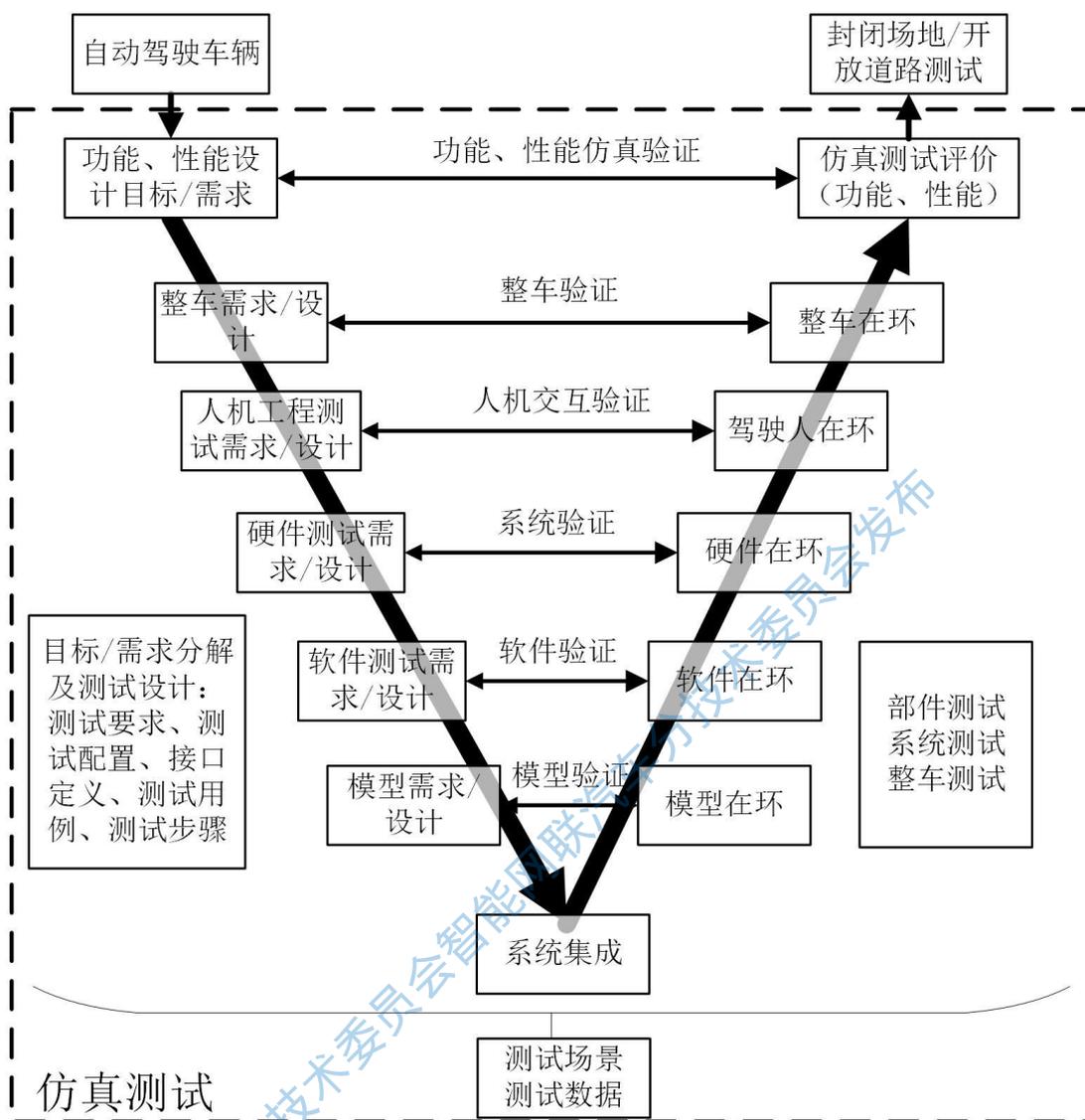


图 17 仿真测试阶段的层次关系图

每一个测试阶段按照一般的软件测试方法设计测试要求、测试配置、接口定义、测试用例、测试步骤和测试数据等。自动驾驶系统主要包括：环境感知系统、决策规划系统和控制执行系统，外界环境信息和车辆动态信息通过感知系统收集，通过通讯接口传输到决策系统运算，生成操作指令输出控制系统，控制车辆各组件运行，如加速、转向等，从而实现自动驾驶功能。在上述三个主要子系统中分别包括了传感器模型、决策模型、控制对象模型及对应的软件和硬件部件，按照从部件到系统的原则，在每一个阶段均涉及自动驾驶的三个主要组成系统测试。为便于高效设计、开发、测试及验证，在仿真测试环节中，对上述子系统及其涉及的模型、软件和硬件可根据需要分别开展仿真测试，在此基础上开展对自动驾驶算法、组件及系统集成的整车测试。即对自动驾驶系统的模型算法、计算平台、

域控制器等依次开展模型在环、软件在环、硬件在环测试，之后对整车开展驾驶员在环和车辆在环测试。

对于仿真测试阶段，典型的测试流程包括：测试需求分析、测试资源配置、接口定义、设计测试用例、执行测试、对测试结果进行分析以及测试结束条件等主要环节。

**测试需求分析：**明确仿真测试任务和目的，以此制定测试要求。明确仿真任务的输入，被测自动驾驶系统的功能规范和性能指标，主体架构框图（包含系统输入输出及子系统间输入输出关系），被测系统操作运行范围（ODD），测试范围，相应的文档说明。明确仿真测试系统的性能要求（同步性、实时性、稳定性等）和应用范围。明确仿真结果的输出要求，仿真输出的数据格式及内容，仿真输出数据频率，仿真数据结果分析，相应的文档及测试报告要求。明确仿真所需资源，时间要求、人员要求、人员所承担的责任、仿真工具要求、仿真模型要求、场地要求等。

**测试配置：**根据测试项目和需要，对仿真系统进行的参数设置工作。包括车辆模型配置、静态场景配置、动态场景配置、传感器模拟配置、控制器配置等主要过程。其中，车辆模型配置主要设置空气动力学、动力传动系统、制动系统、转向系统、悬架系统、轮胎等；静态场景配置主要是设置道路参数，包括道路、标线、标志、护栏、植被、路灯、天气等，生成场景文件；动态场景配置主要是目标模型的输入，包括车辆、行人、动物以及他们之间的动态关系；传感器模型配置主要是通过传感器、摄像头、毫米波雷达、激光雷达、超声波雷达的物理特性根据仿真测试需求进行建模；控制器配置主要是设置供电配置电压、接口配置和协议配置。

**接口定义：**主要包括各子系统和单元间接口的匹配和开发工作，接口类型包括数据格式接口、通信接口、执行期和控制器之间的接口以及特殊接口等，典型单元包括车辆模型、环境模型、传感器模型、高精度地图等。

**测试用例：**兼顾测试充分性和效率的原则，对自动驾驶测试任务的描述、搭建和执行过程，具有可重复性。描述主要包含功能描述、静态场景、动态场景、期望测试结果、通过标准等方面，搭建主要包括硬件初始化、软件初始化、参数初始化、功能定义数据库、自然驾驶数据库的调用和场景设置，执行过程主要包

括测试输入（包括场景输入、驾驶人操控输入、指令输入和通信输入）、前提和约束、测试实施过程、监控和测试自动化、终止条件等步骤。

系统校核与验证。根据需求分析结果，设计验证场景或工况，对仿真测试系统（包含软件和硬件）进行校核和验证。根据仿真测试系统的设计要求对仿真测试系统进行校核。根据仿真测试系统的应用需求，结合道路试验和台架试验测试结果对仿真测试系统进行逐层级验证，即先进行层级较低的子系统验证，再进行层级较高的系统验证，最后形成整套仿真测试系统的验证。验证后对仿真测试系统的验证范围和置信度进行评估。如果不满足测试要求，则需要重新开展第二步，仿真测试系统设计，迭代进行，直至满足测试要求。

测试执行：根据被测系统测试需求，制定试验大纲，试验大纲包含被测系统的测试场景或工况，试验时间安排，试验方法，试验环境，试验人员安排，试验输出的数据或信号内容定义。通过软件运行，开展具体的仿真场景测试工作，从而取得测试对象针对仿真平台输入信号的响应数据的过程。包括初始状态设置、测试车辆运行、目标车辆添加、测试车辆决策、测试过程监控、测试过程自动化、数据存储等环节。

测试结果：检查数据是否按照指定频率及格式存储。对仿真结果进行数据处理，进行数据分类、统计、筛选、可视化。对仿真结果进行数据分析，确保仿真结果没有超出仿真测试系统的应用范围，确保仿真结果达到一致性要求。根据仿真结果，按照测试任务要求，结合仿真测试系统的置信度，以及被测自动驾驶系统的评价指标，对被自动驾驶系统进行评价，并评估是否满足测试要求和测试目标。

测试结束条件：主要用来评价系统仿真测试是否达到预定要求，通常包括

- a. 已按要求完成预定的系统测试任务；
- b. 实际测试过程遵循了预定的测试计划；
- c. 客观、完备地记录了测试过程和测试中发现的所有问题；
- d. 测试的全过程自始至终在控制下进行；
- e. 测试中的异常有合理解释或者正确有效的处理；
- f. 全部测试用例、测试软件和测试配置项已完成，数据已记录。

仿真测试体系由组织管理体系和过程管理体系组成。

### 5.2.3 仿真测试与场地测试、道路测试的关系

总体上，仿真测试是加速自动驾驶研发过程和保证安全的核心环节，场地测试是自动驾驶研发过程的有效验证手段，道路测试是检测智能网联汽车系统性能的必要环节，也是实现自动驾驶商业部署的前置条件。因此，自动驾驶系统需要经过仿真测试，场地测试，道路测试等测试流程才能够满足安全上路需求。三者的相关关系如图 18 所示。



图 18 自动驾驶测试流程

仿真测试是加速测试进程的有效手段：从测试场景的效率方面对比，受限于硬件和实车测试的物理条件限制，单位时间内，通过仿真能够测试更多的场景，利用仿真测试方法可以大幅度加速测试进程。

此外，道路测试受制于气候、地理和物理因素等客观条件，比较难以重现性模拟交通事故、恶劣天气、复杂场景等测试条件，而仿真测试可以通过模拟方式，构建标准化的测试场景，满足对自动驾驶边界条件的重复测试，从而满足训练自动驾驶算法的要求。

三者由于自身测试特点，适合覆盖的测试类型如下表所示：

测试类型	一般场景	危险场景	边角场景
仿真测试	√	√	√
场地测试	√	√	
道路测试	√		

图 19 给出了三支柱法的一个应用案例。

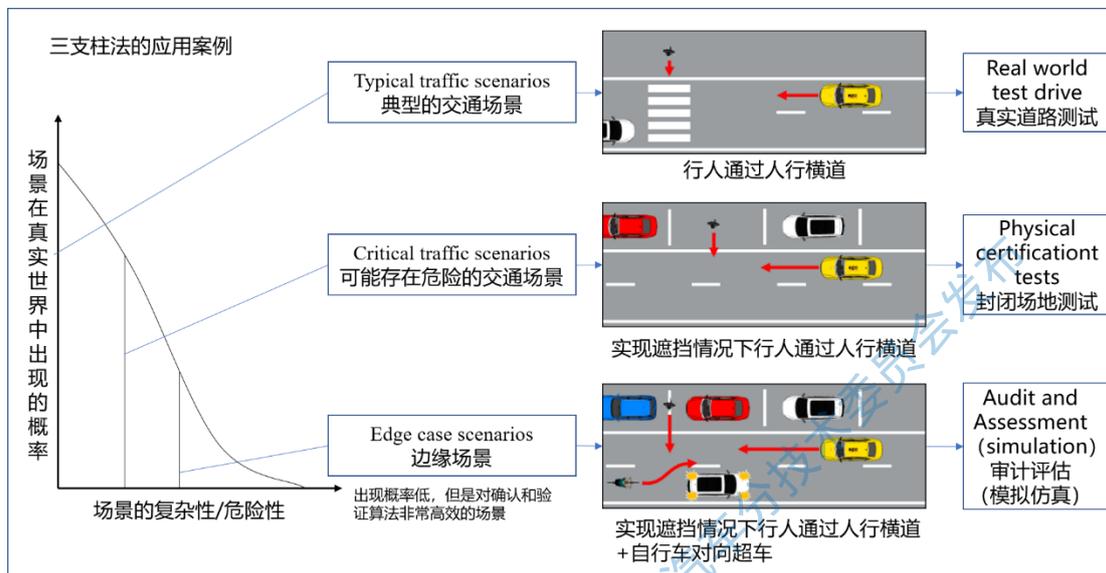


图 19

### 5.3 仿真测试数据管理

#### 5.3.1 仿真测试数据采集

自动驾驶仿真测试中需要采集的数据包括：智能网联汽车运行过程中感知系统传感器数据，自动驾驶决策控制系统数据、网联系统数据、路测设施数据、高精度地图数据。且在数据采集环节中，需要保障仿真测试数据的全面性、真实合理性、稳定性以及安全性等。

软件在环数据采集：根据 ISO-26262 中推荐的系统开发流程 V 模型，初期对于自动驾驶进行原理和软件系统验证的软件在环测试技术，是基于虚拟场景的集成式自动驾驶测试方法。通过对自动驾驶算法模型化、自动驾驶场景数字化等手段对自动驾驶算法层进行仿真测试。通过软件在环测试，采集自动驾驶感知算法、自动驾驶决策控制算法在不同驾驶测试场景下的驾驶感知和决策信息，用于决策信号的合理性以及稳定性评估。

硬件在环数据采集：硬件在环仿真测试（HIL）是系统开发与验证重要的一

环，在核心控制算法验证形成后，集成部分真实硬件系统对 ADAS/AD 功能进行测试分析。HIL 测试将真实的传感器硬件（如摄像头、激光雷达、毫米波雷达等）以及控制器加入仿真环路，在软件中模拟虚拟的车辆及运行环境，通过模拟不同工况，来验证传感器及控制器的功能是否满足需求。以视频黑箱和雷达目标回拨模拟器进行传感器信号仿真的硬件在环台架为例，需要采集的数据包括：雷达目标回拨模拟器所接收的目标信息；视频黑箱显示屏所呈现动静态场景信息；车辆动力学模型所模拟的虚拟车辆的加速、减速或转向信号数据；被测的 ADAS/AD 控制器所输出的控制信号。

**驾驶员在环数据采集：**驾驶员在环测试（DIL）是一种人工验证的方法，用于验证具有人工输入的汽车控制器中的嵌入式软件性能。通过将真实的驾驶员置于仿真回路用于服务自动驾驶相关研发测试。通过使用驾驶模拟器逼真的模拟车辆在各种工况下的车辆状态，并通过视觉、体感、触感反馈和声效等方式让驾驶员对被测目标进行主观性能评估，支撑后续应用的开发验证。需要采集的数据包括：监测驾驶员生理数据，如眼动、皮肤电流以及心电脑电等；驾驶员驾驶行为操作数据：刹车油门踏板等；场景数据；所集成的 ADAS/AD 控制器控制信号、人机交互系统交互数据；虚拟车辆或运动平台的动力学数据。

**车辆在环数据采集：**车辆在环测试（VIL）是将整车嵌入到仿真测试环境中进行测试，通过系统功能测试、网络通信测试、故障诊断测试等模拟场景测试，从而实现功能验证、仿真场景测试、整车控制系统匹配测试的目的。通过车辆在环仿真测试可采集多系统测试数据，对自动驾驶系统的感知、决策、执行、网联通信数据进行采集，对车辆个系统的兼容性以及功能完整性进行验证。

仿真测试数据采集，对应到不同的测试环节及验证系统，需要采集但不限于的数据，整理见下表：

表：不同的测试环节应当采集的仿真测试数据

测试验证环节	验证系统	采集数据
软件在环	自动驾驶核心算法，如感知系统、控制系统	感知原始数据及目标级数据，控制决策数据等
硬件在环	高级驾驶辅助系统/自动驾驶控制器	感知原始数据或目标级数据、车辆动力学数据、被测控制器所输出的控制信号
驾驶员在环	人机交互系统、ADAS/AD	驾驶员生理数据、驾驶员驾驶行为

	控制器	操作数据、场景数据、ADAS/AD 控制器控制信号、人机交互系统交互数据、虚拟车辆或运动平台的动力学数据
车辆在环	整车功能	自动驾驶系统的感知、决策、执行、网联通信数据

### 5.3.2 仿真测试数据存储

#### 5.3.2.1 数据库选择

自动驾驶仿真测试数据的数据量巨大，需要利用大数据云平台进行海量数据的存储与处理。随着车联网技术要求的提高，大数据平台存储作为汽车和交通数据中心、生产中心和开放中心，为车联网产业链上的各个环节提供数据接口和开放环境。

仿真测试数据的存储方式采用 MySQL, Oracle 和 SQL Server 三大主流数据库，根据实际汽车数据复杂程度、系统版本以及数据格式匹配等条件选取数据库。按照存储数据的介质在库里建立相应数据库，根据汽车的性质、指标等各项数据分不同类型进行存储，每一种属性建立一张存储表。

#### 5.3.2.2 数据格式定义

针对各家使用的数据库类型不同，各家可采用相应模型读取提前准备好的模拟数据或者是测试数据，构建仿真模型数据的自适应存储。

#### 5.3.2.3 数据存储安全

测试与仿真数据作为自动驾驶系统上路前的实验数据和上路后的参考数据，起到决策辅助作用。这类数据贯穿自动驾驶系统的全生命周期，在其生命周期内的数据存储安全较为重要。试场景数据是自动驾驶系统在封闭环境下进行自动行驶时所获取的数据信息，包括障碍物信息、交通规则信息等，在采集绘制高精地图时可能会存储部分敏感位置信息。此类数据的完整性和可用性是决定测试结果准确性的重要前提。如果此类数据被篡改会导致测试数据集的准确性降低，直接影响自动驾驶功能的安全性和可靠性。确保此类数据的存储安全、存储数据防篡

改、使用安全，防止未授权人对于仿真测试数据的访问是在做数据安全防护时应重点考虑的。

### 5.3.3 仿真测试数据分析

仿真测试阶段，会使用大量的测试数据来验证分析自动驾驶的功能，并对自动驾驶未来上路运行情况进行预演。首先对大量数据进行标注，提取自动驾驶场景数据，之后利用数据对自动驾驶感知和决策模型进行训练，同时构建虚拟仿真车辆模型，对自动驾驶系统的安全性和鲁棒性进行验证。在环测试技术的引入使自动驾驶系统测试可以搬入计算机虚拟进行，直接使用采集所得的仿真测试数据进行分析。而且通过加速仿真、并行计算等技术，节省大量的测试验证时间和测试环境构建成本。

仿真测试数据分析的目的，一是在理论上检验该种车型或系统是否能够达到安全上路的指标，二是进一步验证自动驾驶系统以及整车功能，支撑自动驾驶算法学习、ADAS 功能测试、人机交互以及接管行为和测试场景等应用。

仿真测试数据的分析处理，还必然将会应用到人工智能技术以及大数据技术进行辅助分析。如感知系统中视觉信息的分析提取需要深度学习算法进行目标物的识别；自动驾驶设计运行范围（ODD）场景的识别需要应用人工智能模式识别技术；DIL 仿真测试数据的分析可通过人工智能方法建立驾驶员模型；大量传感器数据、路测数据、仿真测试数据以及车辆状态监控数据的需要使用大数据平台技术进行数据挖掘。

## 5.4 仿真测试评价方法

仿真测试评价方法主要包括评价维度、评价指标、输出结果等。对仿真的真实性、一致性和可信度进行验证。应从法规要求、功能安全、算法有效性、决策实时性等多个方面综合提出自动驾驶仿真测试评价体系，增强支撑智能网联汽车研发与测试的现实意义。

### 5.4.1 仿真测试用例评价指标选取

#### 5.4.1.1 评价依据

标准化交通场景确定之后，自动驾驶算法接入仿真平台即开始测试，当前的评价依据尚未统一，但评价数据来源基本相似，均来自于仿真测试中功能直接表现，间接表现，及整体表现。部分企业将自动驾驶测试评价的依据分为原子结果和车辆状态：

- (1) 原子结果：自动驾驶系统从起点出发之后所有的细微表现：如是否闯红灯，压实线，是否发生碰撞，是否达到终点；
- (2) 车辆状态：自动驾驶系统从起点出发之后到终点的全程过车中的油门、刹车、转向状态；
- (3) 整体结果：自动驾驶系统从起点出发之后的所有场景表现：通过的场景及功能。

部分企业也将自动驾驶功能测试评价依据分为直接表现，间接表现和整体表现：

- (1) 直接表现：自动驾驶功能感知层、决策层、执行层在仿真测试中应对测试场景时的直接信息交互：如感知层是否能有效识别目标，决策层是否能做出有效且正确的控制决策，执行层是否能按照决策层的控制信号正确且有效的执行；
- (2) 间接表现：自动驾驶功能在仿真测试过程中的驾乘舒适度；
- (3) 整体表现：自动驾驶功能是否满足设计要求，是否发生碰撞，是否违反交通法规，是否通过测试用例。

#### 5.4.1.2 测试用例通过评价指标

一级指标	二级指标	三级指标	四级指标
合规性	遵守交通规则	不压线	车辆与标线的相对位置
		按照道路指示标志行车	指示标志识别性等

	满足在用的其他标准法规的要求		
安全性	不发生交通事故	不与车辆发生碰撞	本车与周边车辆的相对速度和位置
		不与行人发生碰撞	本车与行人的相对速度和位置

### 5.4.1.3 微观评价指标

基于仿真测试场景，进行微观层面的评价，对自动驾驶系统对场景的感知，决策和规划等能力进行评价，可分别评价感知融合、决策规划、控制等模块功能。

一级指标	二级指标
模块输出稳定性	频率均值
	标准差统计
感知 (各种天气、光线条件下)	漏检
	错检
	多检
融合	漏融
	错融
	多融
决策	车距保持
	变道时机及速度
	切入时机及速度
	与大型车辆的侧向、纵向安全距离
规划 (基于决策的前提下，规划处的轨迹)	安全系数
	舒适系数
	压力系数
控制 (基于规划输出的轨迹)	寻迹的精确度

### 5.4.1.4 宏观评价指标

基于通过的场景，进行宏观层面的评价，对自动驾驶系统在连续场景的整体能力进行评价。

一级指标	二级指标	三级指标
安全 (量化 ODD, 量化功能)	车内人员监控能力	驾驶员监控
		乘员监控
	自车操作能力	自车速度
		自车行为
	ODD	静态实体
		环境条件
		动态实体
	OEDR 交互能力	道路使用者
		非道路使用者
	失效响应能力	超出 ODD
传感器系统失效		

一级指标	二级指标	三级指标	四级指标
体验	舒适性	主观评价	驾驶安全感受
			驾驶舒适感受
			驾驶效率感受
			系统可用性体验
		客观评价	误报警率
			漏报警率
			被动接管率
			平均千米接管次数
			紧急接管发生率
			纵向速度变化率
	纵向加速度变化率		
	侧向速度变化率		
	侧向加速度变化率		
通行效率	通行时间	最小理论通行时间与实际使用时间比	

## 5.4.2 仿真测试评价维度

系统级指标是指将自动驾驶系统的智能性分拆到子系统或者子能力等指标，对子系统或子能力分别进行测试评价，进而汇总成为整车的智能性评价结果。整车级指标虽然能反映整车级别的智能性优劣，但对自动驾驶系统环境感知、决策规划和控制等子系统缺乏直观反映，并未指出具体哪项系统的不足和以后需改进的方向；另外自动驾驶系统的智能行为由环境—任务—车辆三者交互激发出，不同 ODD 和任务对车辆智能行为影响不同。系统级指标虽然能直观反映各子系统或子能力的优劣，但是自动驾驶系统是一个复杂的智能体，子系统或子能力之间并没有绝对的相对重要性关系。自动驾驶系统智能性评价指标确定后，需要选择合适的评价方法，以确定评价对象在各评价指标上的评价结果，包括定量评价方法和定性评价方法。

### 5.4.2.1 定量评价方法

定量评价方法采用数学的方法，收集和处理数据资料，最终以精确的数值概括全部的评价信息，包括独立指标评价方法和联合指标评价方法。

- (1) 独立指标评价方法不区分不同指标之间的重要性差异，在获得评价对象在各个指标的评价结果后并没有关联在一起形成总体评价。
- (2) 联合指标评价方法用多个评价指标分别说明被评价对象的不同方面，最终对各评价指标结果综合，用一个总指标来说明被评价对象的综合水平。该方法在建立指标体系后还需要进一步确定指标权重并选择集结模型。

### 5.4.2.2 定性评价方法

定性评价方法利用专家的知识、经验和判断，通过观察被评价对象的表现或状态，以归纳分析等非量化手段对自动驾驶系统进行评价。最终的评价结果是感知、决策、控制、安全性、合规性、效率、舒适性等综合水平划分，而非精确的数值。定性评价方法可采用蛛网模型，从一个原点往外辐射出 N 条轴，每条轴代表一个系统的关键技术，在每个轴上根据技术成熟度分为若干个等级，最后把每条轴上的对应点连接起来构成蛛网的纬线，以此评价测试车辆。

## 5.5 仿真测试流程与评价方法标准化可行性

通过本章对于行业现状与需求的梳理与分析，仿真测试流程与评价方法标准化需求及其可行性分析对应如下表所示。

标准化对象	必要性	可行性	建议启动
仿真测试流程	必要	近期不可行：目前行业将仿真测试应用于开发与验证不同环节，其中开发环节的测试流程无需进行标准化，验证环节的测试流程尚无统一的可行方案，不具备标准化的基础。	推迟启动
仿真测试数据管理	不必要： 测试过程中的细节操作无需标准化。		不启动
仿真测试评价方法	必要	近期可行：针对基础仿真测试场景中规定的场景制定统一的通过评价方法与指标。	优先启动

## 5.6 小结

建议立即启动自动驾驶功能基础仿真测试场景通过评价方法的标准化工作。

## 6 自动驾驶功能仿真测试标准化结论

综合本报告中以上各章中的标准化建议，优先启动仿真测试的术语和定义、仿真测试对象及其要求、仿真测试的可重复性和真实性要求、自动驾驶功能基础仿真测试场景及其通过评价指标的标准化工作；推迟启动：仿真模型精度要求、仿真测试工具之间及仿真工具内部的数据传输接口、仿真测试工具性能要求、仿真测试场景设计方法、仿真测试场景管理方法、仿真测试场景数据格式、仿真测试流程的标准化工作；不启动：仿真测试的全面性要求、仿真测试场景评价方法、仿真测试数据管理的标准化工作。

综上所述，推荐启动《智能网联汽车 自动驾驶功能仿真试验方法及要求》，内容包含仿真测试的术语和定义、仿真测试对象及其要求、仿真测试的真实性和可重复性要求、自动驾驶功能基础仿真测试场景及其通过评价指标。该标准将与《智能网联汽车 自动驾驶功能场地试验方法及要求》《智能网联汽车 自动驾驶功能道路试验方法及要求》相结合构成多支柱中的重要部分，并与《智能网联汽车 自动驾驶系统通用技术要求》配合服务自动驾驶技术的发展。

全国汽车标准化技术委员会智能网联汽车分技术委员会发布